



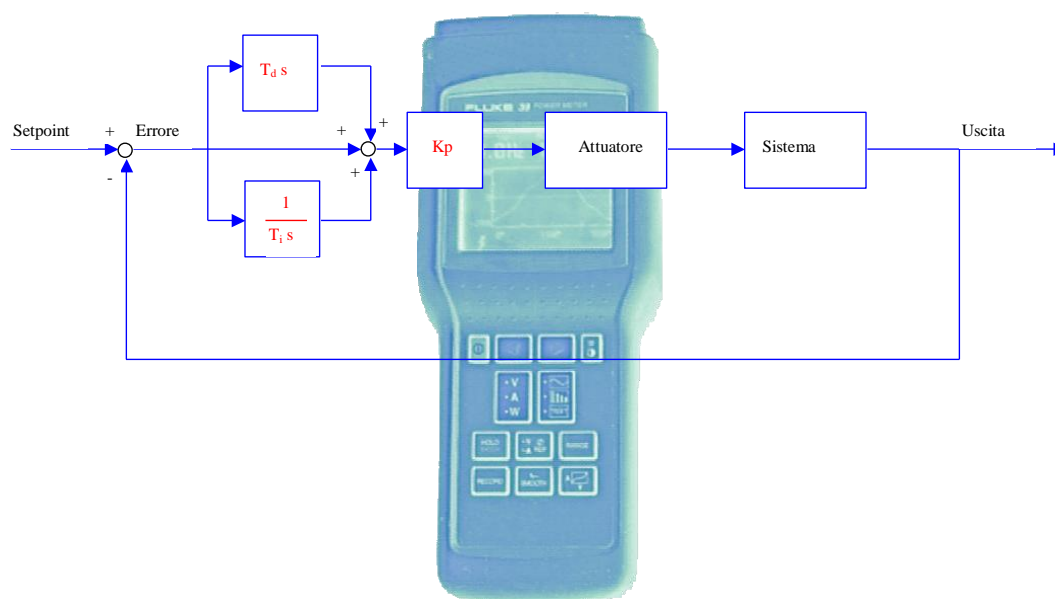
SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

INGEGNERIA CIVILE E INDUSTRIALE

Dispense dal Corso di

SISTEMI DI MONITORAGGIO E CONTROLLO DEGLI IMPIANTI ENERGETICI

*Prof. Luciano Gramiccia
Prof. Luigi Sorabella*



IV - RASSEGNA DEI PRINCIPALI TIPI DI SENSORI

Con la collaborazione di

*Ing. Luisa Ferroni
Ing. Paolo Fargione*

Rev. 4 - Marzo 2019

CAPITOLO IV

RASSEGNA DEI PRINCIPALI TIPI DI SENSORI

A Cura del Prof. Gramiccia e del Prof. L. Sorabella

INDICE

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUZIONE | 7 |
| 1.1 | Generalità | 7 |
| 1.2 | Classificazione degli strumenti di misura | 7 |
| 1.3 | Componenti degli strumenti di misura | 8 |
| 1.4 | Criteri di scelta della strumentazione | 8 |
| 1.4.1 | <i>Fattori operativi</i> | 8 |
| 1.4.2 | <i>Fattori disturbanti</i> | 9 |
| 1.4.3 | <i>Fattori non operativi.</i> | 10 |
| 1.5 | Prestazioni degli strumenti | 10 |
| 1.5.1 | <i>Campo di misura</i> | 10 |
| 1.5.2 | <i>Caratteristica statica</i> | 10 |
| 1.5.3 | <i>Isteresi</i> | 11 |
| 1.5.4 | <i>Ripetibilità ed accuratezza</i> | 12 |
| 1.5.5 | <i>Risoluzione e sensibilità</i> | 12 |
| 2 | CONNESSIONE DELLA STRUMENTAZIONE | 13 |
| 2.1 | Alimentazioni normalizzate | 13 |
| 2.1.1 | <i>Alimentazione pneumatica (Norma IEC 382)</i> | 13 |
| 2.1.2 | <i>Alimentazione elettrica</i> | 13 |
| 2.2 | Segnali normalizzati | 13 |
| 2.2.1 | <i>Segnali pneumatici (IEC 382)</i> | 14 |
| 2.2.2 | <i>Segnali elettrici (IEC 381)</i> | 14 |
| 2.3 | Ricevitore | 16 |
| 3 | SENSORI PER LA MISURA DI LIVELLO DI LIQUIDI | 17 |
| 3.1 | Sensori basati sulla legge di Stevino | 17 |
| 3.2 | Sensori basati sulla legge di Archimede | 18 |
| 4 | SENSORI PER LA MISURA DELLA VELOCITÀ E DELLA PORTATA DI FLUIDI | 19 |
| 4.1 | Sensori basati sul principio di Bernoulli | 19 |
| 4.1.1 | <i>Tubo di Pitot</i> | 19 |
| 4.1.2 | <i>Tubo di Venturi</i> | 21 |
| 4.1.3 | <i>Diaframma o orifizio tarato</i> | 23 |
| 4.1.4 | <i>Boccaglio</i> | 25 |
| 4.1.5 | <i>Confronto tra sensori basati sul principio di Bernoulli</i> | 26 |
| 4.2 | Sensori ad elica | 26 |
| 4.3 | Sensori termici | 27 |
| 4.4 | Misura diretta delle portate volumetriche | 28 |
| 5 | SENSORI PER LA MISURA DELLA PRESSIONE | 30 |
| 5.1 | Manometro a colonna liquida | 30 |
| 5.2 | Manometro del tipo “tubo ad U” | 31 |

| | | |
|-------|---|-----------|
| 5.3 | Manometro a tubo ad U differenziale | 33 |
| 5.4 | Misuratori di pressione a spostamento | 34 |
| 5.4.1 | <i>Tubo di Bourdon</i> | 34 |
| 5.4.2 | <i>Molla di Bourdon</i> | 35 |
| 5.4.3 | <i>Membrana corrugata o Diaframma</i> | 36 |
| 5.4.4 | <i>Manometro a soffiato</i> | 36 |
| 5.4.5 | <i>Trasduttori per sensori di pressione meccanici a spostamento</i> | 38 |
| 6 | SENSORI PER LA MISURA DELLA TEMPERATURA | 55 |
| 6.1 | Sensori basati su variazioni dimensionali | 56 |
| 6.1.1 | <i>Lamine bimetalliche</i> | 57 |
| 6.1.2 | <i>Termometro a liquido</i> | 58 |
| 6.1.3 | <i>Termomanometro a liquido (a tubo di Bourbon)</i> | 59 |
| 6.1.4 | <i>Termometro a gas</i> | 60 |
| 6.2 | Sensori basati su effetti termoelettrici | 61 |
| 6.2.1 | <i>Termocoppie</i> | 61 |
| 6.2.2 | <i>Termoresistenze</i> | 70 |
| 6.2.3 | <i>Termistori</i> | 75 |
| 6.2.4 | <i>Confronto tra RTD e Termistori</i> | 76 |

1 INTRODUZIONE

1.1 Generalità

La strumentazione dedicata al controllo dei processi industriali attende principalmente alle seguenti funzioni:

a) Misura:

effettuata con componenti/dispositivi, che raccolgono informazioni dal processo: sensori, trasduttori e trasmettitori

b) Regolazione:

effettuata con componenti/dispositivi, che dalle informazioni provenienti dal processo, modulano l'energia fornita al processo stesso: Regolatori e attuatori

c) Controllo/sorveglianza/supervisione:

effettuata con componenti/dispositivi, che permettono di osservare il funzionamento del processo: Indicatori, registratori e calcolatori

d) Sicurezza:

con componenti/dispositivi, che rendono sicuri processi pericolosi ad alta pressione e/o temperatura, elettrici, chimici, ecc, verso l'uomo e l'ambiente: Allarmi, blocchi e protezioni

In generale quindi, la strumentazione industriale, è una strumentazione di misura, non solo nella funzione a) propriamente di misura, ma pure nelle funzioni b), c), d), in quanto per poter regolare, controllare e garantire la sicurezza, abbisogna di componenti e/o dispositivi interni e/o esterni, che rilevano le informazioni dal processo.

1.2 Classificazione degli strumenti di misura

La classificazione degli strumenti di misura non è univoca potendosi effettuare in base ai diversi fattori che li caratterizzano; di fatto essa varia da autore ad autore o da costruttore a costruttore gli strumenti.

Tra i fattori presi in considerazione ricordiamo

- principio di funzionamento;
- natura della grandezza misurata (grandezza di *input*);
- natura della grandezza restituita (grandezza di *output*);
- legge fisica utilizzata.

Una classificazione tra le più ricorrenti è basata sulla seguente differenziazione delle grandezze da misurare:

- strumenti destinati a misurare grandezze cinetiche (legate al moto dei corpi rigidi, quali posizione e velocità);
- strumenti destinati a misurare grandezze di processo (livello, pressione, portata, temperatura);
- strumenti destinati a misurare grandezze diverse, tra cui quelle elettriche.

Nell'ambito di questo corso ci si limiterà alla descrizione della strumentazione utile alla misura di grandezze di processo dei sistemi a fluido, quindi alla misura e regolazione dei seguenti principali parametri:

- livello
- portata

- pressione
- temperatura

1.3 Componenti degli strumenti di misura

Uno strumento si basa, in genere, sugli elementi riportati nella figura seguente:

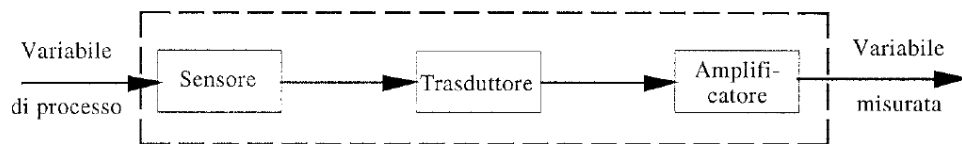


Figura 1 – Schema generale di uno strumento di misura

- **Sensore**
elemento primario di una catena di misura che converte la variabile di processo in un segnale misurabile, secondo una legge fisica. Il sensore deve perturbare il minimo possibile il processo; e deve adeguarsi opportunamente al campo di misura specifico;
- **Trasduttore:**
dispositivo che converte un segnale misurabile o una variabile fisica o chimica (variabile di ingresso) in una variabile di uscita della stessa o di diversa natura, secondo una legge definita;
- **Amplificatore:**
Dispositivo che converte la variabile di uscita di in sensore/trasduttore in un segnale normalizzato.

I tre componenti sopra elencati formano il classico:

- **Trasmettitore:**
strumento di misura con segnale di uscita normalizzato

I sensori presentano, generalmente, una rosa di scelta abbastanza limitata mentre, al contrario, i trasduttori presentano una possibilità di scelta molto più ampia.

1.4 Criteri di scelta della strumentazione

Le fasi fondamentali per la realizzazione di un sistema di strumentazione efficiente sono quelle di

- progettazione;
- installazione;
- taratura o “messa a punto”.

Senza pretese di completezza, e con la pratica impossibilità di entrare in dettagli maggiori, ci si limita qui ad elencare i principali fattori che vanno tenuti in conto nella realizzazione di un sistema di strumentazione.

1.4.1 Fattori operativi

Sono quei fattori che caratterizzano il vero e proprio funzionamento dello strumento; tra essi ricordiamo

- Definizione dell’ingresso e dell’uscita dello strumento ed, in particolare:

- Grandezze che si vogliono misurare (ingresso);
 - Campo di variabilità dell'ingresso;
 - Forma di presentazione richiesta per l'informazione trasmessa (uscita); ad esempio tensione o corrente elettrica (alternata o continua), pressione, posizione lineare od angolare, ecc.;
 - Esigenze di standardizzazione per l'uscita: per poter collegare tra loro organi costruiti da ditte diverse, si è infatti ricorsi alla standardizzazione del formato delle grandezze d'uscita (i formati più usati prevedono: per la pressione un intervallo $0,2 \div 1$ atm, per la tensione un intervallo $0 \div 10$ V, per la corrente un intervallo $0 \div 20$ mA).
- Caratteristiche di trasduzione richieste:
 - Precisione globale, o eventualmente accuratezza;
 - Ripetibilità;
 - Valore minimo ammesso per il rapporto (componente utile) / (componente di disturbo) relativamente alla grandezza rilevabile in uscita;
 - Linearità.
 - Origine degli errori
 - Caratteristiche dell'alimentazione di potenza, quando necessaria
 - Installazione e manutenzione:
 - Intervalli massimi tra due tarature successive per mantenere la precisione richiesta.
 - Dissipazione di calore e conseguenti esigenze di riscaldamento o refrigerazione.
 - Tempo necessario per l'installazione.
 - Tempo necessario per la taratura.
 - Materiali costruttivi.
 - Tipo e manutenzione delle linee di trasmissione in uscita.

1.4.2 Fattori disturbanti

Sono quei fattori che possono alterare il funzionamento dello strumento; tra essi ricordiamo

- Fattori termici:
 - Limiti estremi dell'escursione di temperatura possibile per il trasduttore;
 - Limiti estremi dell'escursione di temperatura possibile per le linee di trasmissione;
 - Sorgenti o pozzi di calore posti in vicinanza del trasduttore che potrebbero portare a gradienti di temperatura all'interno di esso.
- Altri fattori ambientali:
 - Intervallo possibile di variazione della pressione;
 - Velocità possibile per la variazione della pressione durante il funzionamento;
 - Umidità massima possibile;
 - Presenza di liquidi, vapori o gas corrosivi (acidi o alcalini);
 - Immersione in atmosfere deflagranti;
 - Presenza di polveri, eventualmente abrasive, nel fluido circostante, e loro qualità (inerti, carboniose, metalliche, ecc.).
- Fattori meccanici:
 - Vibrazioni possibili per i trasduttori.
 - Vibrazioni possibili per le linee di trasmissione.

- Accelerazioni.
- Variazioni del campo gravitazionale (per i trasduttori installati su sistemi in moto, quali navi, aerei, treni, razzi, ecc.).
- Campi elettromagnetici:
- Radiazioni nucleari ed elettromagnetiche:

1.4.3 Fattori non operativi.

Sono quei fattori che non hanno un'influenza diretta sul funzionamento dello strumento ma di cui bisogna tener conto nella scelta; tra essi ricordiamo

- Prezzo.
- Disponibilità.
- Tempo di consegna.
- Peso.
- Dimensioni.
- Esigenze di installazione.
- Vita media prevista.
- Esigenze di manutenzione.
- Reperibilità delle parti di ricambio.
- Prezzo delle parti di ricambio.
- Parti di ricambio necessarie a magazzino.
- Addestramento del personale per la manutenzione.
- Grado di presenza del personale per la sorveglianza durante il funzionamento.
- Esigenze di sicurezza per il personale.
- Addestramento del personale per l'uso.

1.5 Prestazioni degli strumenti

1.5.1 Campo di misura

Il *campo di misura* (detto anche, con termine inglese, *range*) di uno strumento viene definito in uno dei due seguenti modi:

- dalla differenza tra valore massimo e valore minimo misurabile dallo strumento;
- dal rapporto tra valore massimo e valore minimo misurabile dallo strumento.

Il valore massimo misurabile da uno strumento è detto *fondo scala* dello strumento.

1.5.2 Caratteristica statica

Le prestazioni di uno strumento si possono in genere desumere direttamente dalla *caratteristica statica* dello strumento; essa esprime, in forma analitica o grafica, la relazione esistente, a regime, tra l'ampiezza della grandezza in input e di quella in output.

Di solito, tale caratteristica è ottenuta per interpolazione di valori sperimentali dell'uscita in funzione dell'ingresso

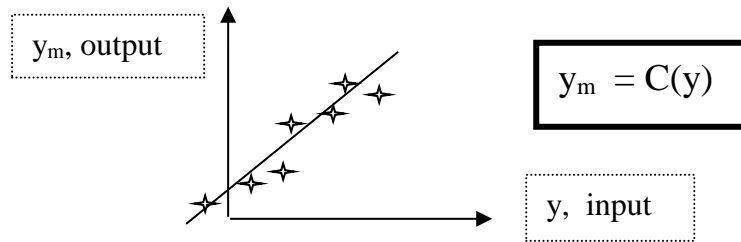


Figura 2 – Caratteristica statica di uno strumento¹

I coefficienti della funzione $C(y)$ sono funzione dell'errore quadratico medio, funzione, a sua volta, dello scostamento tra i punti effettivamente misurati e la curva interpolante.

L'inverso dell'errore quadratico medio viene indicato come *conformità della caratteristica*.

La pendenza locale (derivata) della caratteristica è detta *sensibilità statica*; essa è costante se la $C(y)$ è lineare ed, in tal caso, si definisce *fattore di scala*.

Si definisce *errore sistematico* il valore di ingresso y_s , rientrante nel campo di misura, per cui la $C(y_s) = 0$ ovvero l'uscita è nulla.

Le prestazioni statiche possono essere dedotte solo da osservazioni dirette e, dunque, devono essere fornite dal costruttore.

L'insieme delle operazioni che consentono di ottenere la caratteristica statica viene detto *taratura o calibrazione*.

La caratteristica di uno strumento può variare nel tempo a causa di perturbazioni esterne, *disturbi*, che agiscono come grandezze di ingresso non manipolabili seppur eventualmente misurabili.

Si tratta di variabili quali temperatura, umidità, pressione, campi elettromagnetici, etc.

Anche per questi disturbi il costruttore può fornire i valori massimi di variabilità della caratteristica statica dello strumento (*derive*).

1.5.3 Isteresi

Nel corso della calibrazione di uno strumento si deve tener conto separatamente dei valori delle grandezze in uscita ottenute con valori dell'ingresso che vengono via via aumentati (crescenti), e dei valori ottenuti nelle fasi in cui l'ingresso viene via via diminuito. Questo perché lo strumento è in genere soggetto a fenomeni di *isteresi* dovuti, tipicamente, a fenomeni di dissipazione.

Si tratta, in generale, di fenomeni non lineari (legati a variazioni anche dimensionali per effetto riscaldamento) dei quali il costruttore deve segnalare la presenza fornendo, inoltre, la valutazione quantitativa dell'errore che questo può comportare in sede di misura.

¹ In generale non è detto che la caratteristica statica sia rappresentata da una retta (come rappresentato in figura), anche se questa è una caratteristica desiderata.

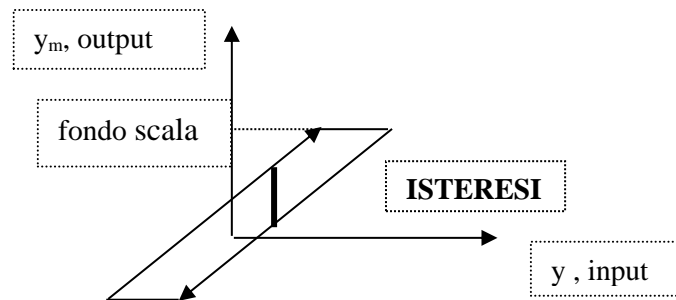


Figura 3 – Isteresi di uno strumento

1.5.4 Ripetibilità ed accuratezza

In fase di taratura, l'osservazione ripetuta del valore della misura in uscita in corrispondenza dello stesso segnale campione permette di giudicare la *ripetibilità* propria dello strumento.

Poiché, in genere, si ottiene una distribuzione statistica di tipo gaussiano dei valori misurati y_m , che dovrebbe teoricamente coincidere col campione, ne consegue che tanto minore è la deviazione standard tanto migliore è la ripetibilità della misura intorno al punto della caratteristica investigato

L'inverso della deviazione standard è detto *accuratezza della misura*.

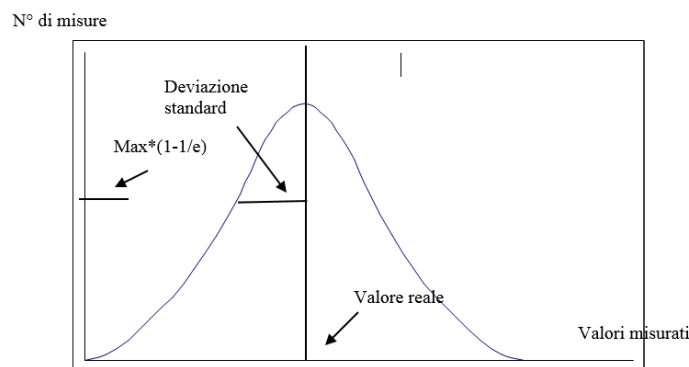


Figura 4 – Distribuzione delle misure

1.5.5 Risoluzione e sensibilità

La *risoluzione* dello strumento corrisponde alla più piccola variazione δy in ingresso per la quale è possibile individuare variazioni apprezzabili dell'uscita.

La risoluzione può essere diversa nei vari punti della caratteristica e, quindi, il costruttore deve fornirne l'andamento, eventualmente in forma grafica.

Quando si opera nell'intorno dell'intervallo di $y_m=0$, non si parla generalmente di risoluzione bensì di *soglia di sensibilità* dello strumento che, dunque, rappresenta il più piccolo valore della grandezza in ingresso y in corrispondenza del quale l'uscita y_m assume valori apprezzabilmente diversi da zero.

2 CONNESSIONE DELLA STRUMENTAZIONE

In questo capitolo saranno illustrate le seguenti caratteristiche della strumentazione analogica, quali:

- Le alimentazioni normalizzate
- I segnali normalizzati
- Il Loop elementare di misura e/o regolazione
- L'inserzione della strumentazione nel Loop elementare

2.1 Alimentazioni normalizzate

Le alimentazioni alla strumentazione di misura, ed in generale al sistema di controllo, sono normalizzate secondo norme internazionali in funzione del tipo di alimentazione.

2.1.1 Alimentazione pneumatica (Norma IEC 382)

La pressione di alimentazione normalizzata è:

140 kPa (1.40 bar): In unita SI
20 psi (1.38 bar): In unita Inglesi

con i seguenti limiti della pressione di alimentazione:

130 - 150 kPa

2.1.2 Alimentazione elettrica

L'alimentazione elettrica normalizzata è generalmente:

2.1.2.1 Per strumentazione da campo (Norma IEC 381)

In tensione continua:

24 Vcc

e normalmente tra 20 e 30 Vcc

2.1.2.2 Per strumentazione da quadro

In tensione alternata:

110 Vca o 220 Vca (50 Hz o 60 Hz)

e generalmente con tolleranza $\pm 10\%$.

2.2 Segnali normalizzati

I segnali di trasmissione, di ricezione ed in genere di interconnessione della strumentazione analogica sono i seguenti:

2.2.1 Segnali pneumatici (IEC 382)

20 - 100 kPa (0.20 - 1.00 bar): In unita SI
 3 - 15 psi (0.21 - 1.03 bar): In unita Inglesi

2.2.2 Segnali elettrici (IEC 381)

I segnali normalizzati sono esclusivamente in continua:

- Segnali in corrente continua (IEC 381-1)

| LIMITE INFERIORE (mA) | LIMITE SUPERIORE (mA) | NOTE |
|--------------------------|--------------------------|------|
| 4 | 20 | (1) |
| 0 | 20 | — |

(1) Segnale preferenziale

- Segnali in tensione continua (IEC 381-2)

| LIMITE INFERIORE (V) | LIMITE SUPERIORE (V) | NOTE |
|-------------------------|-------------------------|------|
| 1 | 5 | (1) |
| 0 | 5 | (1) |
| 0 | 10 | (1) |
| - 10 | + 10 | (2) |

(1) Segnali in tensione che possono essere derivati direttamente da segnali normalizzati in corrente continua (IEC 381 - 1)

(2) Segnali in tensione che possono rappresentare grandezze fisiche di natura bipolare

I segnali normalizzati in corrente continua vengono impiegati nelle normali applicazioni della strumentazione, mentre quelli in tensione continua, vengono impiegati in trasmissioni a non grandi distanze fra varie parti dell'impianto, ed in particolare, nella strumentazione a quadro ed a retroquadro nelle sale di manovra o controllo degli impianti.

Il segnale in corrente continua inoltre, dato il suo "alto livello", è scarsamente influenzato dai disturbi esterni, tipo campi magnetici interferenti, e nello stesso tempo ha un livello di energia sufficientemente basso per essere potenzialmente impiegato per sistemi a sicurezza intrinseca.

Tra i vantaggi del segnale normalizzato in corrente continua rispetto al segnale in tensione continua si possono tra l'altro segnalare:

- non risente della lunghezza della linea di collegamento;
- non risente della impedenza dello strumento ricevitore collegato in un campo di variazione abbastanza elevato.

Nell'ambito dei segnali normalizzati in corrente continua la soluzione preferenziale è quella a "zero vivo" (4 - 20 mA) rispetto quella a "zero vero" (0 - 20 mA) per le seguenti motivazioni:

- consente di distinguere un segnale di valore zero (4 mA) da una condizione di circuito aperto (0 mA);
- consente di alimentare lo strumento sugli stessi due fili di trasmissione-ricezione del segnale;
- consente di alimentare più strumenti dalla stessa sorgente di energia.

Le figure seguenti mostrano le soluzioni di collegamento a 4, 3, 2 fili, che permettono segnali di trasmissione:

- A "zero vero" (0 - mA) v. figure 2-1 e 2-2
- A "zero vivo" (4 - 20 mA) v. figure 2-1, 2-2, 2-3

In particolare la

Figura 5, illustra il tipico collegamento a 4 fili, che prevede alimentazione sia in alternata che in continua sui due fili esterni e ricezione sui due fili interni del segnale di uscita normalizzato che può essere del tipo 0 - 20 mA o 4- 20 mA.

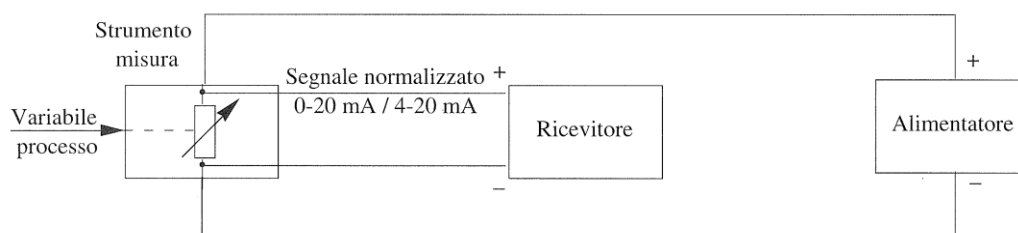


Figura 5 – Collegamento a 4 fili

La Figura 6 illustra invece il collegamento a 3 fili, che prevede esclusivamente alimentazione in continua tra il filo superiore + e il filo inferiore, che è anche il comune per la ricezione del segnale di uscita normalizzato anche in questa soluzione 0 - 20 mA o 4 - 20 mA.

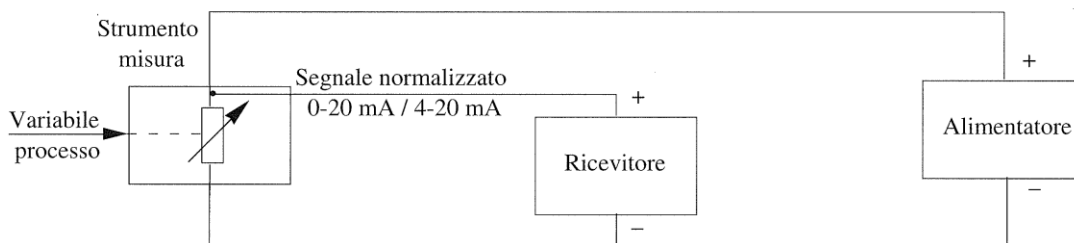


Figura 6 – Collegamento a 3 fili

La Figura 7 illustra, infine, il tipico collegamento a 2 fili, che prevede esclusivamente alimentazione in continua e segnale di uscita normalizzato 4 - 20 mA. Sugli stessi fili di alimentazione viene anche prelevato il segnale di uscita normalizzato.

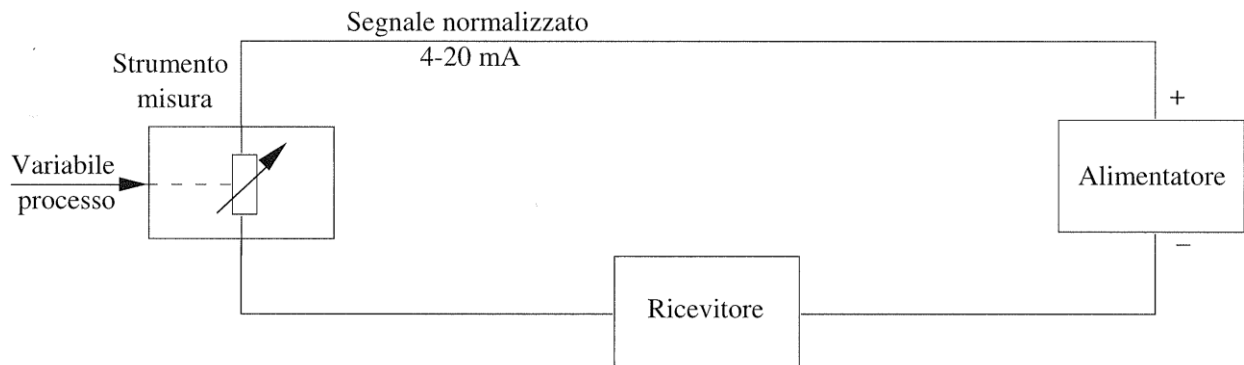


Figura 7 – Collegamento a 2 fili

2.3 Ricevitore

Il ricevitore, rappresentato nelle figure precedenti, riceve il segnale normalizzato e lo traduce per essere utilizzato dal sistema di controllo.

Il ricevitore dovrebbe possedere le seguenti caratteristiche:

- sopportare un segnale di ingresso pari a fino due volte il segnale normalizzato:
40 mA: per segnali in corrente: 4-20 mA
10 V : per segnali in tensione: 1-5 V
- non alterare oltre $\pm 0.1\%$ il segnale ricevuto

Nei caso inoltre di trasformazione del segnale normalizzato da segnale in corrente a segnale in tensione, tramite un resistore, il resistore deve possedere i seguenti requisiti:

- valore nominale di 250 ohm $\pm 0.1\%$ (*)
- coefficiente di temperatura inferiore a 0.01 %/°C

3 SENSORI PER LA MISURA DI LIVELLO DI LIQUIDI

Sebbene il livello dei liquidi nei serbatoi può essere misurato utilizzando diversi principi (ad esempio principi elettrici), i più utilizzati sensori si basano su due principi fisici: la legge di Stevino e la legge di Archimede.

3.1 Sensori basati sulla legge di Stevino

La legge di Stevino, valida per fluidi in equilibrio e a densità costante, afferma che la differenza di pressione tra due punti all'interno del liquido, separati da una distanza verticale h è pari a:

$$p_{inf} - p_{sup} = \rho g h$$

essendo ρ la densità del liquido e g l'accelerazione di gravità.

I trasduttori basati su tale principio consentono, misurando h , di valutare la pressione in un qualunque punto del volume nota la pressione vigente in un secondo punto assunto come riferimento, o, misurando la differenza di pressione tra due punti, di valutare la differenza di quota.

Nel caso di un serbatoio come in Figura 8, il livello di liquido h , misurato rispetto alla quota dove si misura P_{inf} , può essere valutato dalla relazione:

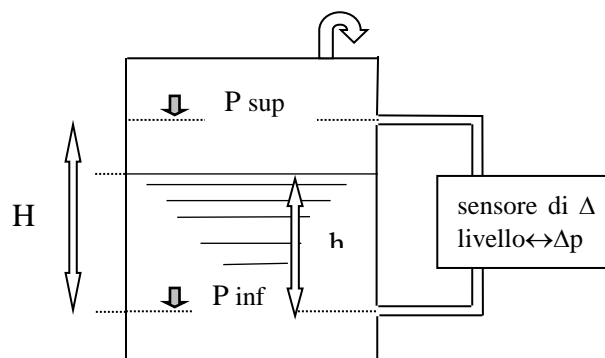


Figura 8 - Misuratore di livello basato sulla legge di Stevino

$$p_{inf} - p_{sup} = \rho_l g h + \rho_g g (H - h)$$

essendo ρ_l la densità del liquido e ρ_g quella del gas che la sovrasta; da questa si ricava:

$$h = (p_{inf} - p_{sup} - \rho_g g H) / g(\rho_l - \rho_g)$$

se, come spesso capita, sopra il liquido c'è aria, la densità ρ_g è molto più piccola rispetto a ρ_l e può quindi essere trascurata, per cui si ha:

$$h = (p_{inf} - p_{sup}) / g \rho_l$$

Ossia misurare il livello equivale a misurare il battente idrostatico.

Nel caso di Figura 8, H coincide con il campo di misura del sensore, ossia il nostro strumento non sarebbe in grado di misurare livelli superiori ad H .

3.2 Sensori basati sulla legge di Archimede

Il principio di Archimede afferma che qualunque corpo, immerso in un liquido, riceve una spinta, dal basso verso l'alto, pari al peso del liquido spostato; se la spinta di Archimede supera il peso del corpo, esso "galleggerà", ossia sarà immerso solo per una parte (quella parte che sposta un volume di liquido il cui peso eguaglia il peso del corpo).

Questo principio viene utilizzato per realizzare galleggianti, che si muovono quindi, verticalmente, costantemente insieme al livello del liquido.

Il galleggiante può essere collegato ad un braccio che può indicare il livello direttamente su una scala graduata, oppure trasmettere un segnale diverso, ad esempio elettrico attraverso un potenziometro, segnale che sarà poi elaborato dal trasduttore per ottenere l'output di livello.

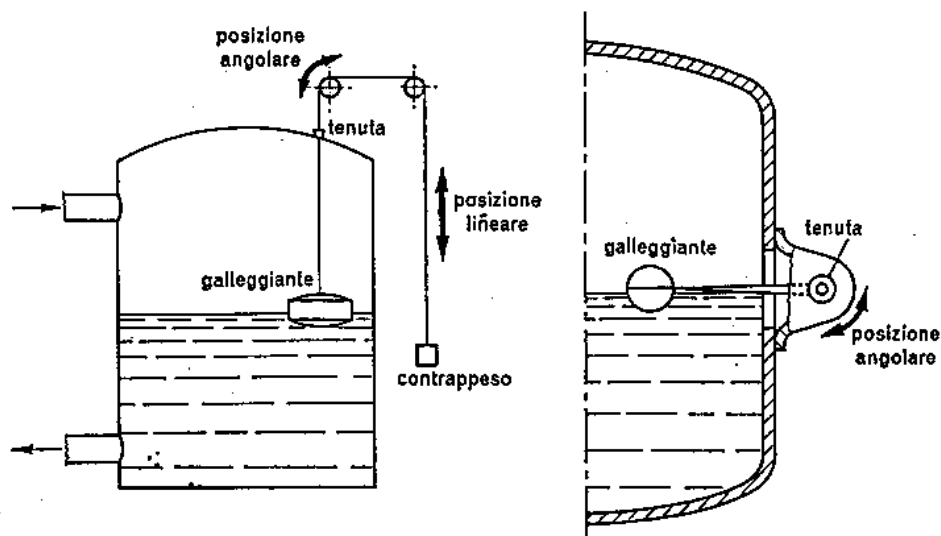


Figura 9 – Misuratori di livello a galleggiante

4 SENSORI PER LA MISURA DELLA VELOCITÀ E DELLA PORTATA DI FLUIDI

La portata di fluido che attraversa un condotto può essere misurata o direttamente o misurando la velocità del fluido nel condotto; infatti il legame tra portata e velocità è univoco ed è dato dall'equazione:

$$\Gamma = \rho v S$$

essendo Γ la portata in massa (kg/s), ρ la densità del fluido (kg/m³), v la sua velocità ed S l'area del condotto (m²). Il prodotto vS rappresenta la portata volumetrica (m³/s) di fluido che attraversa il condotto.

Sebbene esistano misuratori di portata che utilizzano energia esterna al sistema fluidodinamico (che si basano su campi elettromagnetici, ultrasuoni, fenomeni nucleari, etc), i più diffusi sensori permettono di misurare la grandezza desiderata sottraendo al fluido parte della sua energia (e quindi perturbandone in parte il moto).

Nel par. 4.1 saranno presentati tali tipi di sensori.

4.1 Sensori basati sul principio di Bernoulli

Un'importante classe di sensori di velocità (e per quanto detto di portata) si basa sull'applicazione dell'equazione di conservazione dell'energia applicata al moto stazionario lineare di un fluido ideale (privo di viscosità), incomprimibile (equazione di Bernoulli):

$$\rho gh + p + \rho v^2/2 = cost$$

4.1.1 Tubo di Pitot

Se si introducono nella vena fluida due tubi concentrici, il più interno con imbocco parallelo al moto ed il più esterno con imbocco perpendicolare (v. Figura 10), il primo tubo misurerà la pressione totale che vale

$$p_t = p_s + \rho v^2/2 \quad (\text{essendo } h=0)$$

Infatti la linea di corrente b in corrispondenza dell'ingresso del tubo interno, rallenterà fino a fermarsi, per cui l'energia cinetica della vena fluida si trasformerà in pressione statica per il principio di Bernoulli.

La linea di corrente a , invece, scorrerà intorno al tubo esterno e non trasferirà energia cinetica in corrispondenza degli imbocchi perpendicolari, per cui nella camera esterna si stabilirà la pressione statica p_s della vena fluida (v. Figura 10).

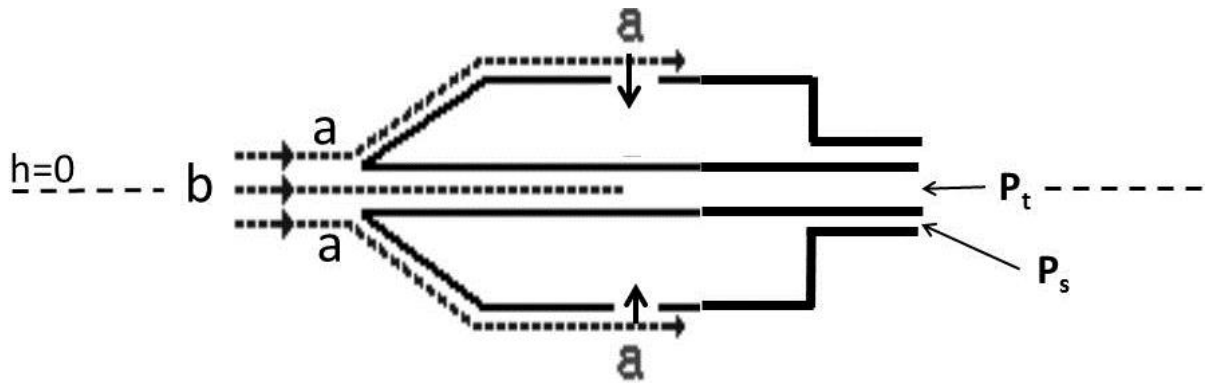


Figura 10 – Principio del tubo di Pitot

Per semplice differenza tra le pressioni misurate dai due tubi si ottiene il carico dinamico

$$p_t - p_s = \rho v^2 / 2$$

e quindi

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot (p_t - p_s)}{\rho}}$$

si ottiene così un sensore di velocità, e quindi indirettamente di portata, attraverso la lettura di una differenza di pressione.

Si osserva che la misura di pressione statica si può effettuare anche in punti diversi da quelli dove si effettua la misura di pressione totale proprio perché la misura non tiene conto del termine dinamico, sempre supponendo la differenza di quota tra le due zone di misura trascurabile.

Per effettuare una misura che fornisce direttamente la differenza di pressione differenziale si usa il tubo di Pitot (v.

Figura 11).

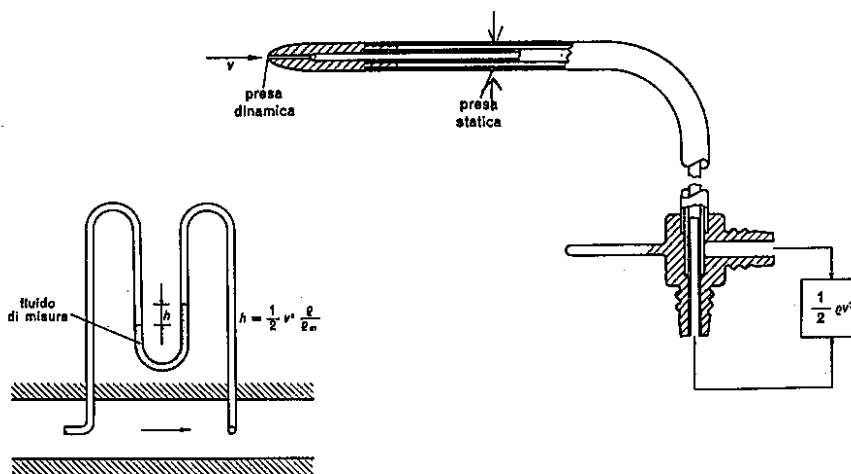


Figura 11 - Tubo di Pitot

Nei fluidi reali, per i quali $\mu \neq 0$ e il profilo di velocità non è piatto, il tubo di Pitot fornisce una misura puntuale, e non media sulla sezione, della velocità, e quindi per determinare la portata con tale metodo senza commettere grandi errori si dovrebbe ricorrere ai seguenti accorgimenti:

- per flussi laminari, dalla misura di velocità puntuale si deve ricostruire il profilo a parabola per calcolare il valor medio della velocità
- per flussi turbolenti, bisogna effettuare una serie di misure puntuali attraverso le quali ricostruire il profilo di velocità reale.

Il campo di misura del Tubo di Pitot risulta limitato inferiormente per il fatto che il carico cinetico, per piccole velocità, diventa comparabile con quello dell'errore.

Complessivamente l'errore ottenibile sulla misura della portata e dell'ordine di qualche per cento.

4.1.2 Tubo di Venturi

Il funzionamento del tubo di Venturi si basa sull'equazione di Bernoulli, applicata a due diverse sezioni (S_1 in ingresso ed S_2) di un condotto (v.

Figura 12), dove si ha:

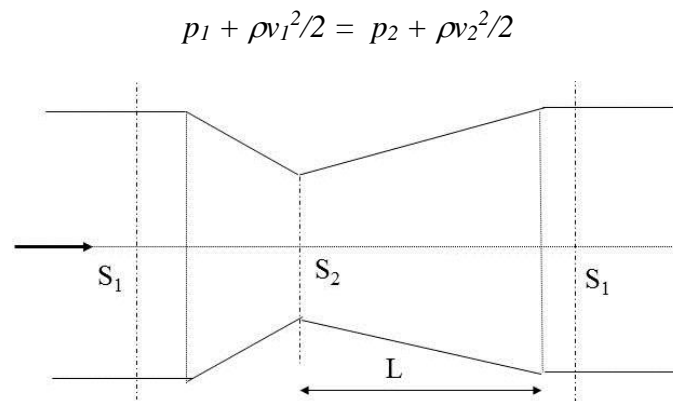


Figura 12 - Schema del tubo di Venturi

Applicando l'equazione di continuità del moto

$$\Gamma = v S$$

e sostituendo Γ al termine cinetico, si ottiene:

$$p_1 + \frac{\Gamma^2 \rho}{2S_1^2} = p_2 + \frac{\Gamma^2 \rho}{2S_2^2}$$

$$\Gamma = \frac{S_1 S_2 \sqrt{2}}{\sqrt{(S_1^2 - S_2^2)}} \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{\rho}} = K \sqrt{\frac{\Delta p_{st}}{\rho}}$$

K →

quindi, noto il K dello strumento e misurate le pressioni si ottiene la portata.

Avendo a che fare con fluidi reali, l'equazione sopra riportata deve essere modificata introducendo dei coefficienti correttivi, ottenuti sperimentalmente, che tengono conto delle dissipazioni dovute alla viscosità a causa dell'inserimento del restringimento di sezione².

Maggiore è la lunghezza del tratto divergente minore sono le perdite di carico dissipative. Sono disponibili tabelle le quali, per i diversi fluidi, i diversi campi di temperatura (variazione di densità), i diversi diametri delle condotte, forniscono le dimensioni dei venturimetri oltre che i coefficienti correttivi per tener conto del fatto che si tratta di fluidi reali.

Lo schema di inserimento delle sonde di pressione è riportato in

Figura 13.

I venturimetri sono, comunque, gli strumenti che, nell'ambito della classe, presentano le minori perdite di carico (minime per il tipo lungo, $L > 20 D$, intermedie per il tipo corto, $L < 20 D$ con D =diametro del condotto)

La precisione della misura che si ottiene è di $\pm 1\%$.

Per quanto riguarda il montaggio del tubo Venturi bisogna disporre di un tratto di tubazione orizzontale di sufficiente lunghezza, sia a monte che a valle.

Sono disponibili venturimetri per diametri da alcuni centimetri fino a più di 1 metro.

Nell'ambito della classe dei misuratori di portata, i costi dei venturimetri sono abbastanza elevati.

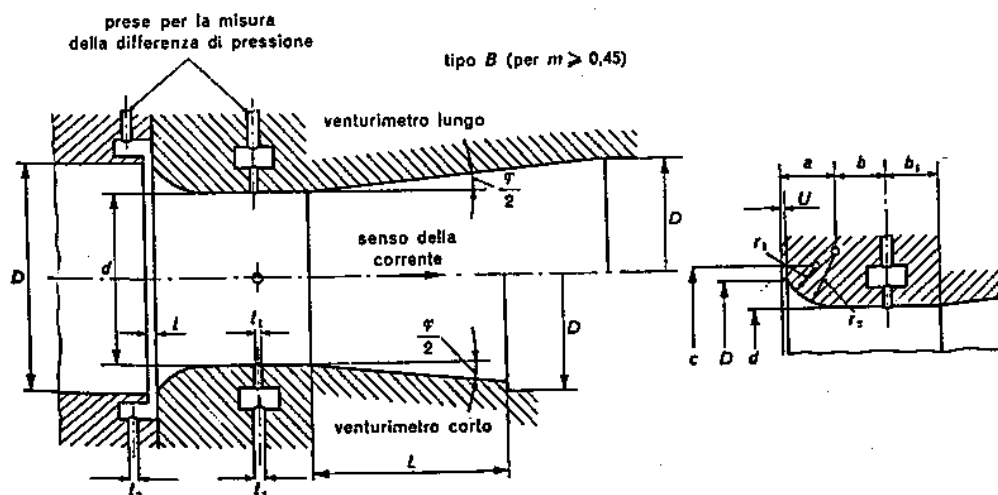


Figura 13 - Schema inserimento sonde in un tubo di Venturi

² Per i fluidi reali, ovvero viscosi, alla equazione di conservazione dell'energia vanno aggiunti i termini che rappresentano le perdite di carico distribuite, KL , e quelle concentrate, ΣH :

$$h + p/\rho g + v^2/2g - KL - \Sigma H = 0$$

In Figura 14 sono riportati 2 tubi di venturi commerciali (nel secondo non è visibile la zona di strizione-allargamento). Si notino gli attacchi per le prese di pressione.



Figura 14 – Tubi di venturi commerciali

4.1.3 Diaframma o orifizio tarato

Si basa sullo stesso principio del tubo di Venturi, con la differenza che la riduzione di sezione è realizzata in modo brusco introducendo nella corrente fluida un setto che riduce l'area di efflusso.

E' estremamente economico ma introduce delle perdite di carico concentrate abbastanza rilevanti rispetto al venturimetro

Nella K_1 dà conto delle perdite di carico distribuite ed H_p della perdita concentrata del diaframma.

Il picco di aumento di carico di pressione a monte dell'orifizio introduce una sorta di anomalia legata al particolare andamento delle vorticosità indotte dalla brusca variazione di sezione le quali introducono componenti tangenziali della velocità, non misurabili né calcolabili, che, di conseguenza, riducono la componente della velocità parallela al flusso.

In Fig. 15 sono riportate le immagini del solo sensore (a sinistra) e dello strumento (a destra).

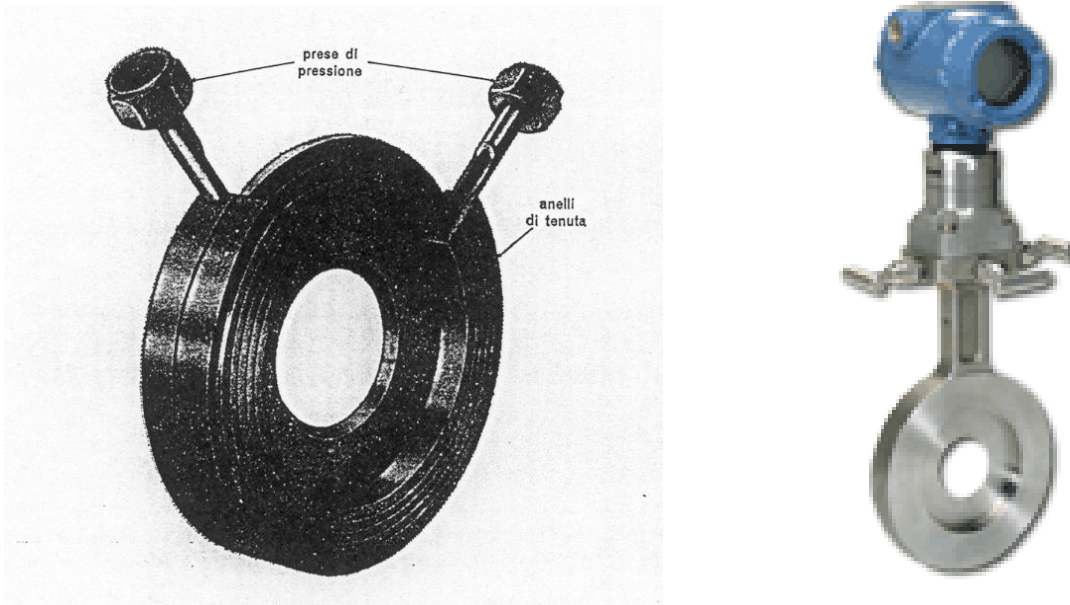


Fig. 15 – Orifizio tarato commerciale

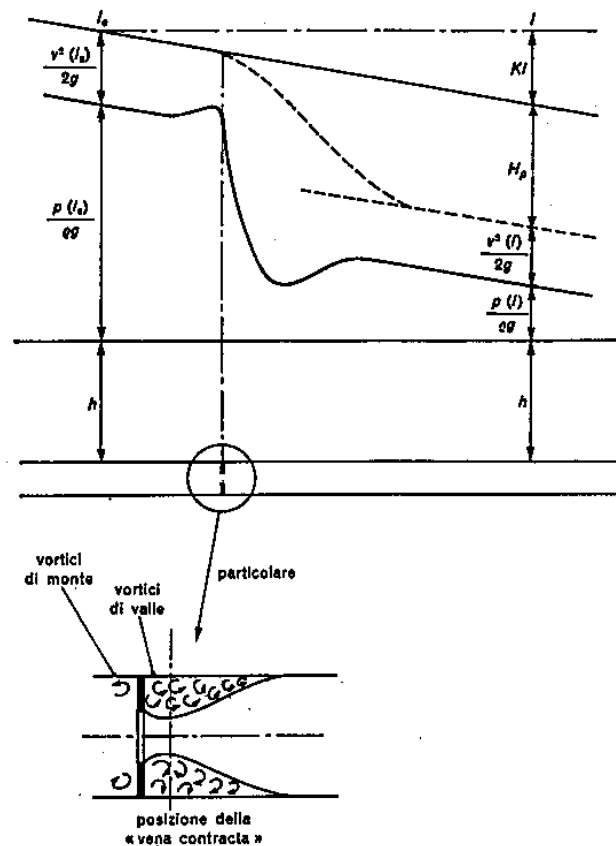


Fig. 16 – Schema ed andamento del carico idraulico nell'orifizio tarato

La misura delle pressioni si effettua, in generale, ben a monte dell'orifizio, per evitare la zona disturbata, e subito a valle di questo, preferibilmente nella zona dove è massimo il restringimento della vena fluida (per avere la massima variazione di velocità e quindi di pressione).

Il termine H_p di perdita di carico concentrato, che è molto elevato rispetto a quello tipico di un analogo tubo di venturi, è pretrattato in fabbrica.

4.1.4 Boccaglio

Si tratta di uno strumento derivato dall'orifizio ma con una geometria "accompagna" meglio il restringimento di flusso; per questo motivo presenta minori perdite di carico rispetto all'orifizio ma meno economico di questo.

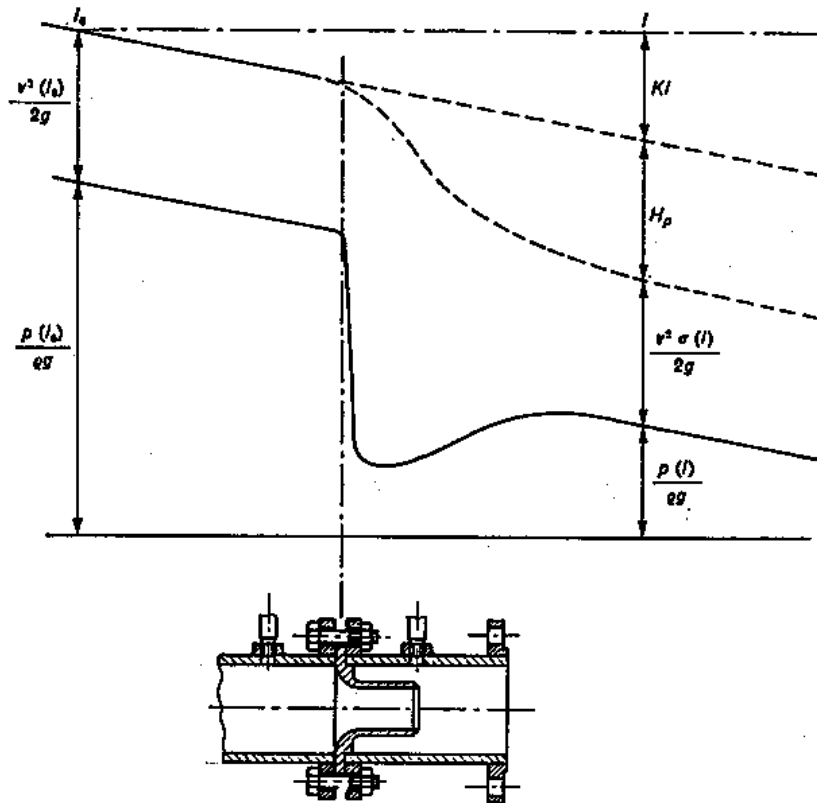


Fig. 17 – Schema ed andamento del carico idraulico nel boccaglio

Per ridurre le anomalie del moto a monte dei dispositivi di misura, in particolare le componenti radiali della velocità che tendono a formarsi a causa dei vortici, a volte si introducono nelle tubazione elementi che servono a stabilizzare il flusso (fig. 18). Essi presentano lo svantaggio di introdurre ulteriori perdite di carico.

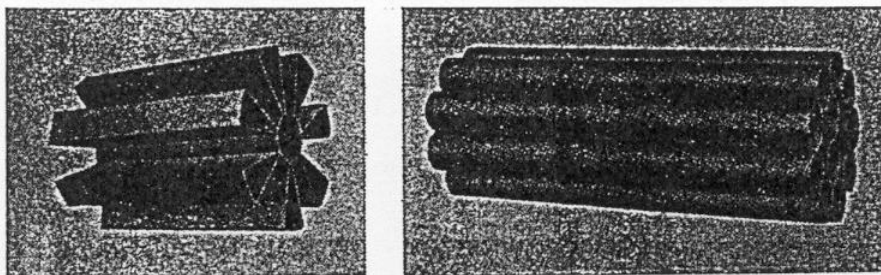


Fig. 18 – Elementi stabilizzatori del flusso per boccagli

4.1.5 Confronto tra sensori basati sul principio di Bernoulli

Per permettere un confronto, si riporta l'andamento tipico delle perdite di carico H_p introdotte in una condotta con l'uso dei sensori di portata sopra descritti; tali perdite variano, ovviamente, con il rapporto di strozzatura introdotto, ossia con il rapporto tra l'area ridotta di passaggio e l'area del condotto.

Si può notare come le minori perdite, e quindi le minori perturbazione del fluido, siano introdotte dai venturimetri, ed in particolare da quelli lunghi, mentre le maggiori perturbazioni sono introdotte dai diaframmi.

Sfortunatamente il costo dei sensori è inversamente proporzionale alle perdite da essi causati perché la riduzione delle perdite di carico è ottenuta con una complicazione geometrica del sensore.

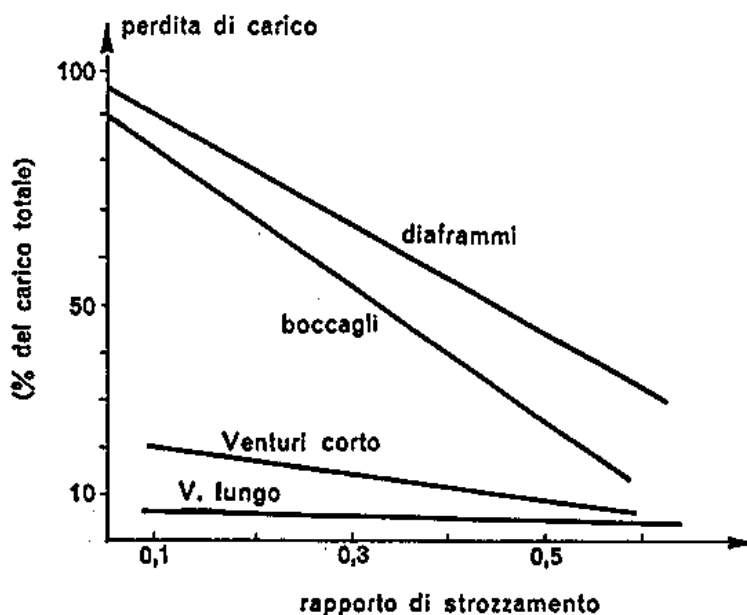


Fig. 19 – Perdite di carico di diversi sensori di velocità

4.2 Sensori ad elica

Il sensore è costituito da un'elica che viene posta in rotazione dalla corrente fluida in modo perfettamente analogo ad una turbina idraulica che viene messa in rotazione dalla corrente fluida.

La velocità di rotazione della turbina è legata alla portata che la attraversa da una legge analoga a quella che esprime la prevalenza delle turbopompe.

Un sensore magnetico (una piccola bobina che costituisce un circuito magnetico) capta il passare delle pale o di una pasticca magnetica su esse inserita, inviando impulsi elettrici ad un rivelatore di frequenza.

Associando alla frequenza captata (e quindi alla velocità di rotazione della turbina) alcuni parametri, quali la densità, la viscosità, la sezione, la geometria delle pale, è possibile avere la conversione in portata.

Gli strumenti di questo tipo offrono un'elevata precisione, fino allo 0.05% (anche se nei modelli più commerciali ci si ferma, solitamente intorno allo 0.15%).

Il rapporto tra massima e minima portata misurabile può giungere a 20.

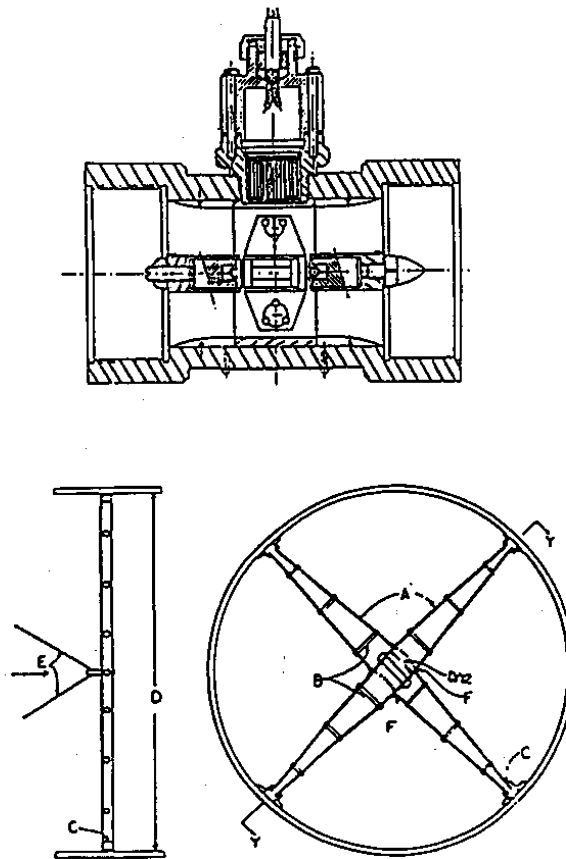


Fig. 20 – Sensori ad elica

4.3 Sensori termici

Il sensore è costituito da un elemento riscaldato ad una temperatura superiore a quella della corrente fluida, che una volta immerso nella corrente, viene quindi raffreddato dal fluido.

In particolare un filo, perpendicolare alla direzione del flusso, riscaldato elettricamente, è inserito nella corrente fluida che lo raffredda in funzione della sua velocità, capacità termica e coefficiente di scambio termico, quest'ultimo funzione della velocità del fluido.

Misurando l'energia assorbita dal sistema per mantenere il filo a temperatura costante è possibile dedurre la velocità.

Misuratori di questo tipo possono raggiungere buone precisioni con testine di misura di dimensioni contenute; sono prevalentemente utilizzati in centri di ricerca; mal si prestano, infatti, per la loro delicatezza, all'utilizzo negli impianti industriali o per garantire prestazioni di sicurezza.

Un'applicazione diffusa anche industrialmente è quella dell'anemometro a filo caldo, utilizzato per la misura della velocità dell'aria.

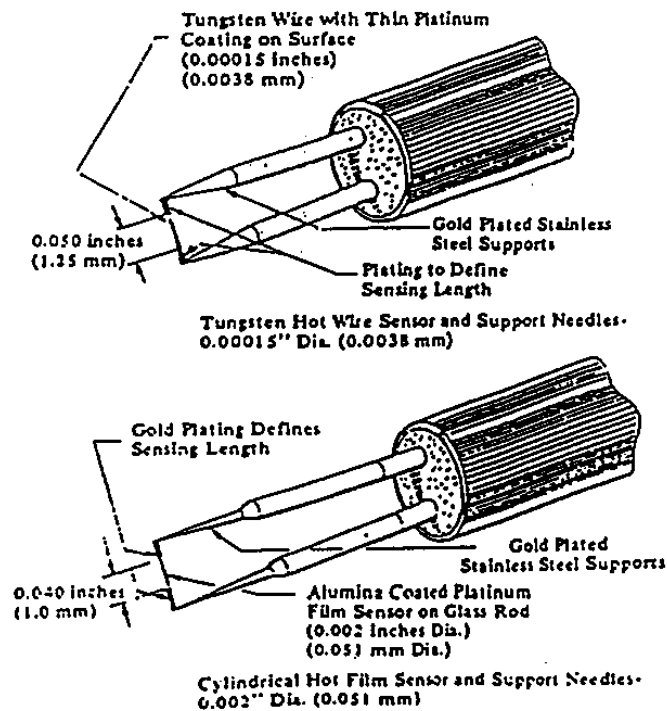


Fig. 21 – Sensori termici

4.4 Misura diretta delle portate volumetriche

Si basa sulla stessa definizione di portata volumetrica, ovvero di volume di fluido transitante nell'unità di tempo attraverso una sezione.

Nel caso di liquidi, operativamente, basta che il fluido riempi un insieme di camere di volume noto; il numero di camere riempite in un intervallo di tempo noto, moltiplicato per il volume delle stesse, dà la misura della portata volumetrica.

Le perdite di carico irreversibili sono limitate e, in genere, equivalgono all'energia persa dal fluido per far muovere i meccanismi che consentono la movimentazione delle camere stesse.

Il dispositivo di questo tipo più semplice è quello a capsulismi anche detto “pompa root”.

La misura si basa sul rilievo del numero di giri dei capsulismi nell'unità di tempo.

Si ottengono precisioni dell'ordine del +/- 0,5%.

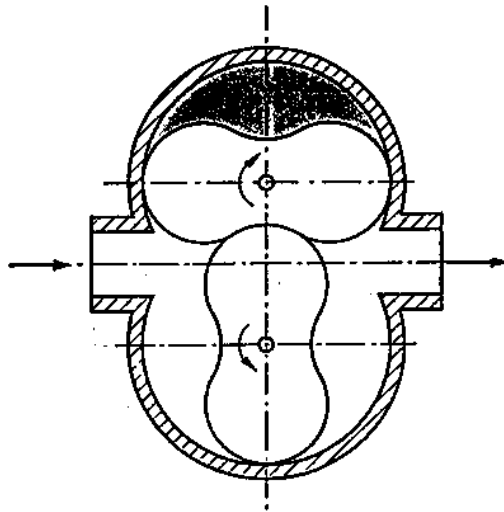


Fig. 22 – Pompa root

5 SENSORI PER LA MISURA DELLA PRESSIONE

5.1 Manometro a colonna liquida

Si tratta di uno strumento molto semplice che, per tale motivo, trova ancora applicazione quando la pressione varia lentamente nel tempo (applicazioni quasi stazionarie) e quando le pressioni da misurare sono basse. Può, inoltre, essere utilizzato per la taratura di altri strumenti.

Esso fornisce il valore della pressione all'interno di un ambiente attraverso la valutazione della altezza di una colonna liquida visibile in un tubo trasparente collegato all'ambiente da misurare.

In fig. 23 è riportato lo schema di un manometro a colonna liquida per la misura della pressione statica in un condotto; dall'equilibrio delle forze idrauliche nel punto di attacco del tubo

$$p_s = p_a + \rho g h$$

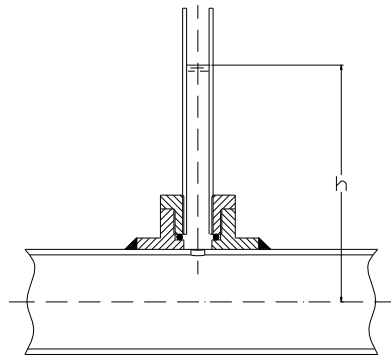


Fig. 23 – Manometro a colonna liquida per la misura della pressione statica

dove p_s è la pressione statica nell'ambiente, p_a la pressione atmosferica, ρ la densità del liquido, g l'accelerazione di gravità ed h l'altezza raggiunta dalla colonna liquida nel tubo.

Se il tubo è immerso come mostrato in fig. 24 (tubo di Pitot), viene invece misurata la pressione totale

$$p_t = p_s + p_d = p_a + \rho g h_d$$

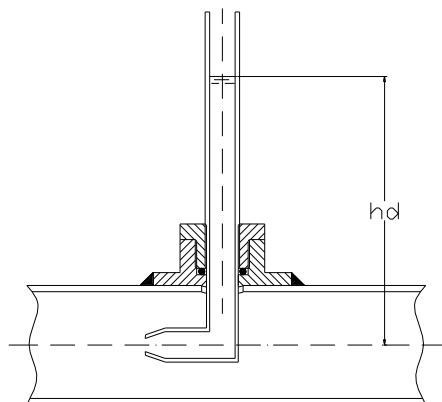


Fig. 24 – Manometro a colonna liquida per la misura della pressione totale

Essendo, di solito, il tubo aperto all'estremità superiore (altrimenti occorrerebbe tener conto dell'eventuale pressurizzazione del gas in esso contenuto), è chiaro che lo strumento è idoneo solo a misurare piccoli valori di pressione; si tenga, infatti, presente che ad una pressione di 1 atm corrisponderebbe un'altezza della colonna nel tubo, nel caso si utilizzasse acqua, di circa 10 m.

È altrettanto evidente che lo strumento, così come rappresentato negli schemi sopra riportati, si presta solo alla misura delle pressioni nei liquidi (i gas fuoriuscirebbero dall'ambiente) quando questi non siano tossici o, comunque, pericolosi (potrebbero, infatti, fuoriuscire).

5.2 Manometro del tipo “tubo ad U”

I manometri del tipo “tubo ad U” si basano sul principio schematizzato in fig. 25; un liquido monometrico è posto in contatto, attraverso una connessione sagomata a forma di U, da una parte con l'ambiente da misurare e dall'altra con un ambiente a pressione costante (ad es. l'atmosfera).

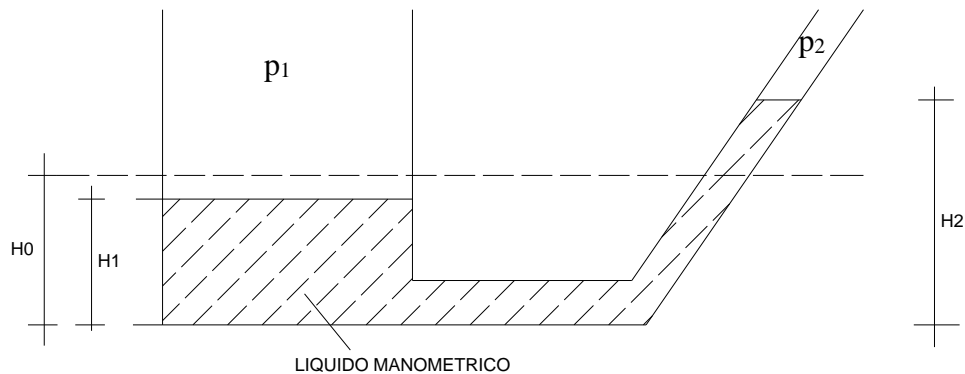


Fig. 25 – Schema di principio del manometro a tubo ad U

Applicando l'equazione di Bernoulli alla base delle due colonne liquide si ottiene:

$$p_1 + \rho g h_1 = p_2 + \rho g h_2$$

detta h_0 la quota dei due peli liberi quando le due pressioni sono uguali (la quota deve essere la stessa per entrambi i peli liberi – principio dei vasi comunicanti), dette A_1 ed A_2 le superfici dei due peli liberi (corrispondenti alle pressioni p_1 e p_2 rispettivamente), dovendo essere uguali i volumi di liquido manometrico che si sposta da una parte all'altra del tubo, risulta:

$$A_1 (h_0 - h_1) = A_2 (h_2 - h_0)$$

Per cui, ricavando h_1 dalla seconda equazione, sostituendo nella prima si ricava:

$$p_1 - p_2 = \rho g (h_2 - h_1) = \rho g \{ h_2 - [A_2 (h_2 - h_0) / A_1 - h_0] \} = \rho g (h_2 - h_0) (1 + A_2 / A_1)$$

$$p_1 = p_2 + \rho g (h_2 - h_0) (1 + A_2 / A_1)$$

Pertanto, letto h_2 su una scala graduata e noti A_1 , A_2 e p_2 , si ricava p_1 .

È evidente che per variare la sensibilità dello strumento si può agire su ρ ed A_2/A_1 ; in particolare sono di seguito elencati i liquidi manometrici più comunemente utilizzati :

| Liquido | Densità a 20°C (kg/m ³) |
|--------------------------|-------------------------------------|
| Olio rosso (Meriam) | 0.8221 |
| Acqua | 0.992 |
| Tetracloruro di carbonio | 1.594 |
| Tetrabromoetano | 2.593 |
| Mercurio | 13.5434 |

Fig. 26 – Fluidi manometrici più comunemente utilizzati

In fig. 27 si riportano alcuni strumenti basati su questo principio (la pressione incognita è sempre quella che sovrasta il pelo libero a sinistra) che prendono anche il nome di *piezometri* quando misurano la pressione rispetto ad un riferimento fisso costante; se la pressione incognita è quella ambiente il piezometro viene anche detto *barometro*.

In fig. 27a è illustrato un *manometro a vaschetta* in cui la misura della pressione avviene misurando la quota del galleggiante.

In fig. 27b è illustrato un *manometro ad U a sezioni uguali*, che consente di misurare la pressione in altezza (mm) di colonna liquida su un'opportuna scala graduata (come esercizio si studi cosa succede se $A_2=A_1$).

In fig. 27c e d sono illustrati due *manometri ad U* analoghi ai precedenti, con la differenza che il tubo di misura è, in pratica, un capillare ($A_2 \ll A_1$) e quindi la variazione di quota del pelo libero nell'ambiente è praticamente trascurabile e la sola quota nel capillare consente di effettuare la misura.

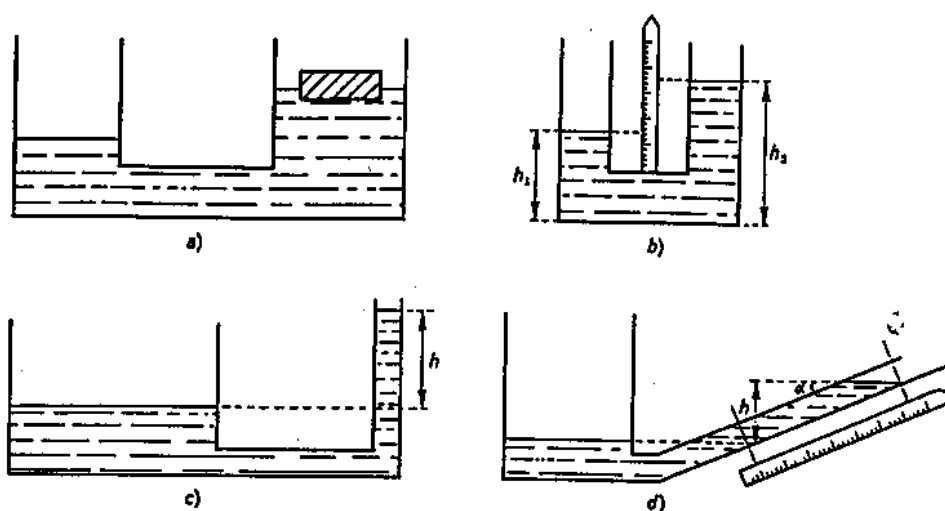


Fig. 27 – Manometri a tubo ad U

In fig. 28 è riportata la tipica disposizione di un manometro ad U.

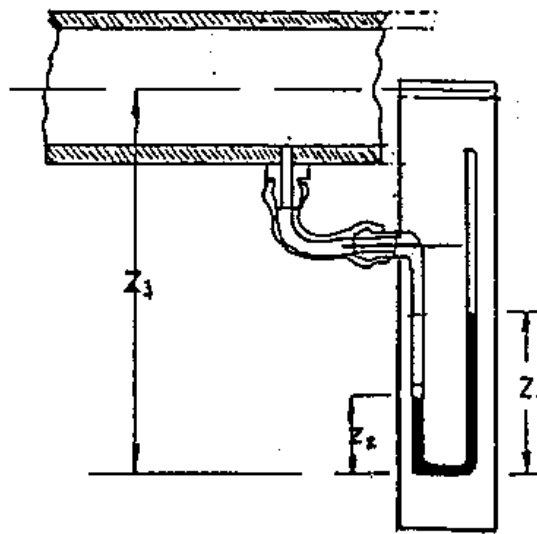


Fig. 28 – Disposizione di un manometro a tubo ad U

5.3 Manometro a tubo ad U differenziale

L'utilizzo del manometro ad U differenziale si ricava immediatamente da quanto detto al paragrafo precedente osservando che il manometro ad U consente di misurare direttamente la differenza di pressione p_1-p_2 esistente tra due punti di un ambiente (ad esempio di una tubazione).

In fig. 29 è riportata la tipica disposizione di un manometro ad U differenziale per misurare la differenza di pressione in un venturimetro.

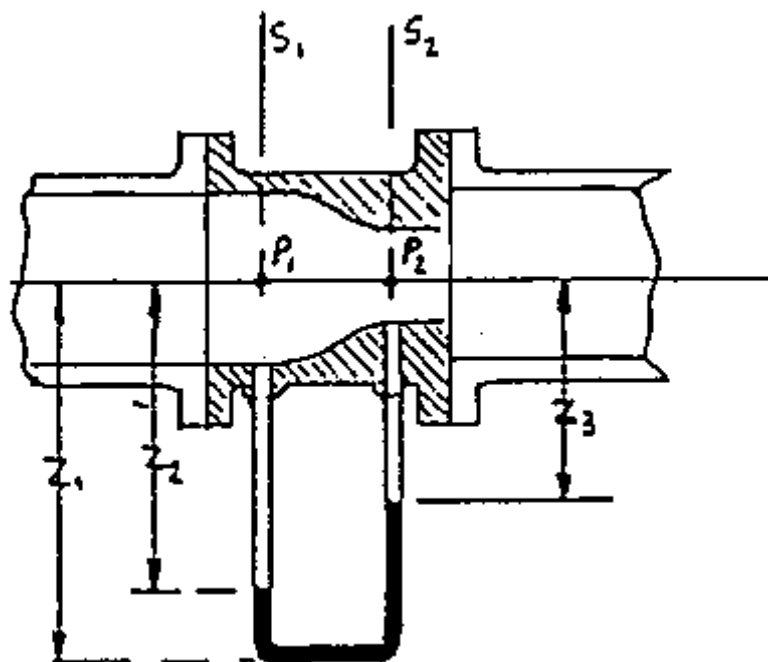


Fig. 29 – Disposizione di un manometro a tubo ad U differenziale

5.4 Misuratori di pressione a spostamento

In questo tipo di strumento si utilizza la deformazione di una struttura causata da una differenza di pressione.

5.4.1 Tubo di Bourdon

È costituito da un tubo a sezione non circolare con sviluppo a forma di arco di cerchio (v. fig. 30) chiuso, ma libero di muoversi, ad un estremo e vincolato dall'altro dove è collegato con l'ambiente oggetto di misura; all'interno del tubo regna la pressione da misurare ed all'esterno una pressione nota (tipicamente quella atmosferica).

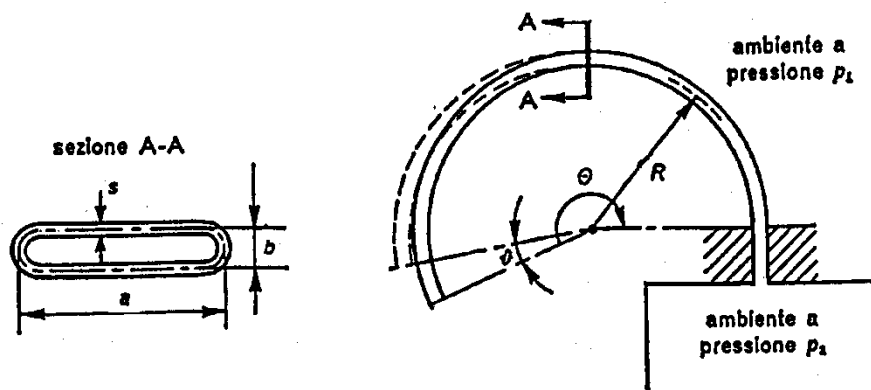
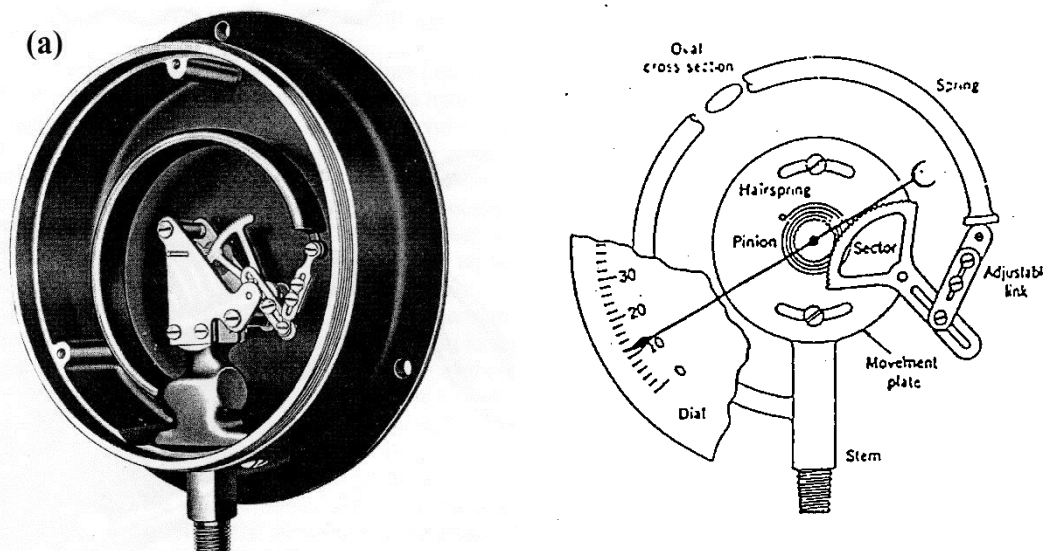


Fig. 30 – Schema e parametri geometrici del Tubo di Bourdon

Se la pressione interna è superiore a quella esterna l'arco di cerchio formato dal tubo tende ad aumentare il suo raggio³ mentre la sua sezione tende a diventare circolare⁴. Il conseguente spostamento dell'estremo chiuso può essere utilizzato come misura della pressione all'interno del tubo.



³ Si pensi al comportamento della trombetta in carta arrotolata che si distende quando si soffia all'interno

⁴ Si ricordi che i tratti piani della sezione "sopportano" la pressione peggio di quelli curvi e quindi si deformano di più. Proprio la circolarizzazione della sezione è causa della rettilinearizzazione del tubo.

Fig. 31 – Tubo di Bourdon

La teoria alla base dello strumento è piuttosto complessa, ma può essere riassunta della seguente equazione, con il significato dei parametri riportati in fig. 24:

$$\frac{\theta}{\Theta} = \frac{K}{E} \left(\frac{R}{s} \right)^\alpha \left(\frac{a}{b} \right)^\beta \left(\frac{a}{s} \right)^\gamma (p_2 - p_1)$$

Essendo E il modulo elastico del materiale che costituisce il tubo e K un coefficiente determinato sperimentalmente.

Si noti come agendo sulla geometria del sensore (a,b,s) si possono variare fortemente il campo di misura e la sensibilità dello strumento.

5.4.2 Molla di Bourdon

È basata sullo stesso principio del tubo di Bourdon, ma con un sensore di forma molto appiattita ed avvolto a spirale; attraverso opportuni cinematismi si rileva, con precisione fino allo 0.1%, l'angolo θ .

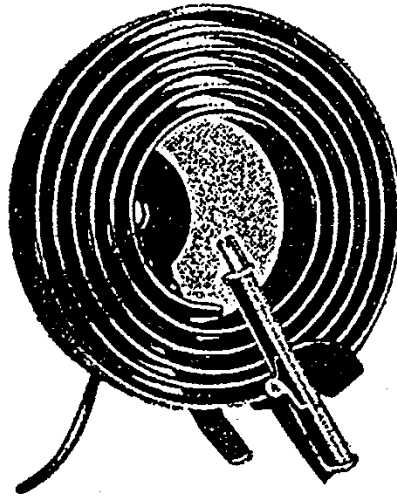


Fig. 32 – Molla di Bourdon a spirale

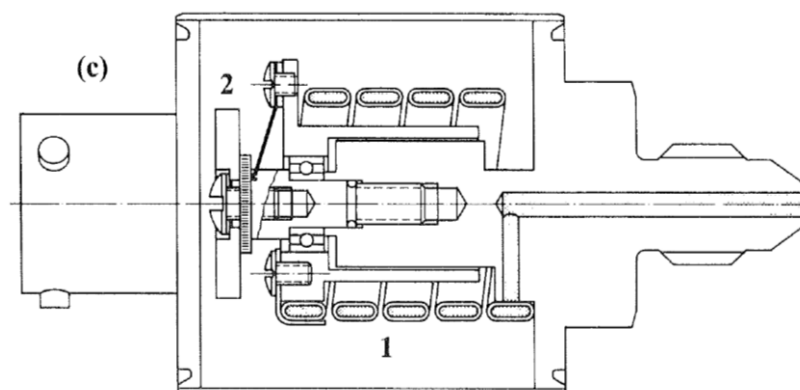


Fig. 33 – Molla di Bourdon ad elica (1) con potenziometro (2)

5.4.3 Membrana corrugata o Diaframma

Si tratta di una lastra sottile sottoposta, da una parte alla pressione incognita (p_1) e dall'altra ad una pressione nota (p_2); la forza che agisce sulla membrana, detta S la sua superficie, è pari a:

$$F_a = (p_1 - p_2) S$$

A questa forza si oppone quella dovuta alla deformazione elastica della membrana:

$$F_r = k y$$

Essendo k la rigidità della membrana (assegnata sperimentalmente) ed y la freccia (deformazione massima della membrana). Egualgiando le due forze si ha:

$$p_1 = p_2 + ky/S$$

Le membrane sono opportunamente corrugate per aumentarne la flessibilità (ridurre il valore di k al fine di avere deformazioni apprezzabili anche con differenze di pressione limitate) e quindi la sensibilità dello strumento.

La risposta della membrana è lineare (ovvero k resta costante) solo se la sua deformazione è piccola (qualche % del raggio); le membrane sono quindi adatte a misurare basse pressioni.

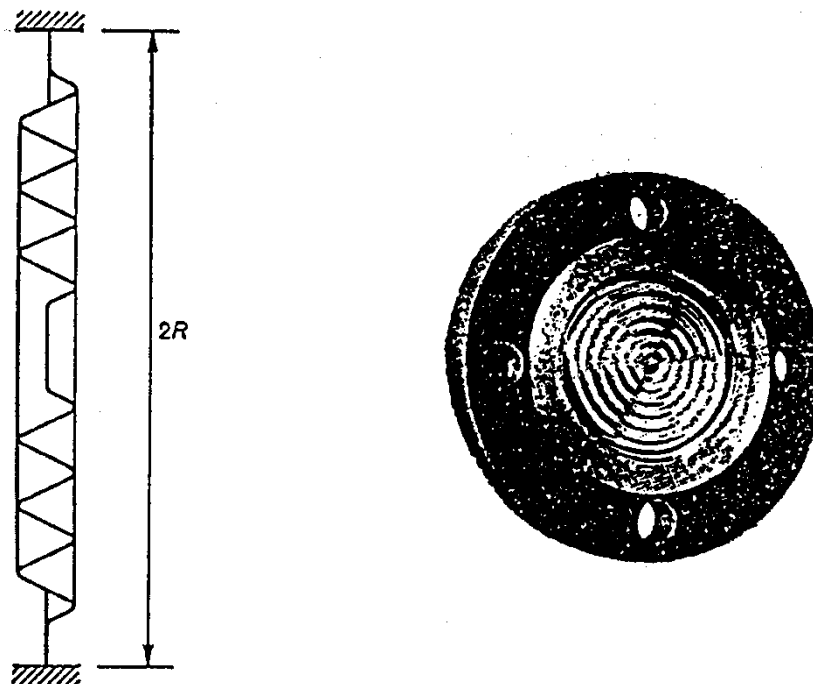


Fig. 34 – Diaframma

5.4.4 Manometro a soffiello

Si basa sullo stesso principio della membrana corrugata e per esso valgono le stesse formulazioni; l'elemento sensibile, invece di una membrana piana è costituito da un tubo la cui flessibilità assiale è fortemente ridotta dall'introduzione di "onde" (soffiello).

Il manometro a soffiello mantiene una risposta lineare in un campo di deformazioni più ampio della membrana corrugata ed è quindi idoneo a misurare pressioni più elevate.

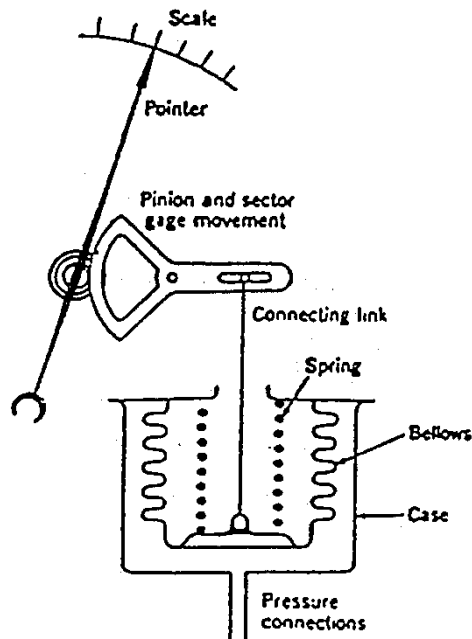


Fig. 35 – Manometro a soffiello (Schema)

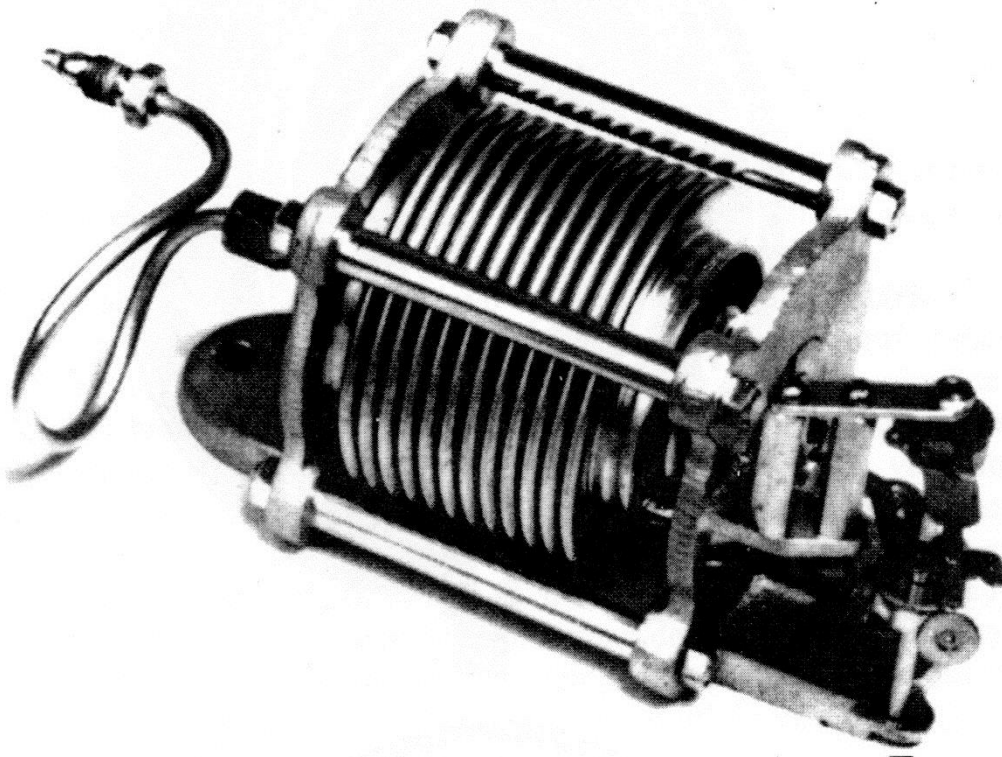


Fig. 36 – Manometro a soffiello

5.4.5 Trasduttori per sensori di pressione meccanici a spostamento

Escludendo i trasduttori di tipo meccanico, che convertono lo spostamento, ad esempio in una rotazione angolare, le altre tipologie di trasduttori utilizzati per convertire lo spostamento del sensore in un segnale di altro tipo, sono le seguenti:

- Trasduttori di tipo elettrico resistivo (Potenziometri)
- Trasduttori di tipo elettrico resistivo (Estensimetri)
- Trasduttori di tipo elettrico induttivo (Trasformatori differenziali)
- Trasduttori di tipo elettrico capacitivo

5.4.5.1 Trasduttori di tipo elettrico resistivo(Potenziometri)

I potenziometri sono dei componenti nei quali la tensione di uscita è legata linearmente a quella di ingresso attraverso un rapporto variabile e funzione delle posizione di un cursore a movimento traslatorio o rotativo.

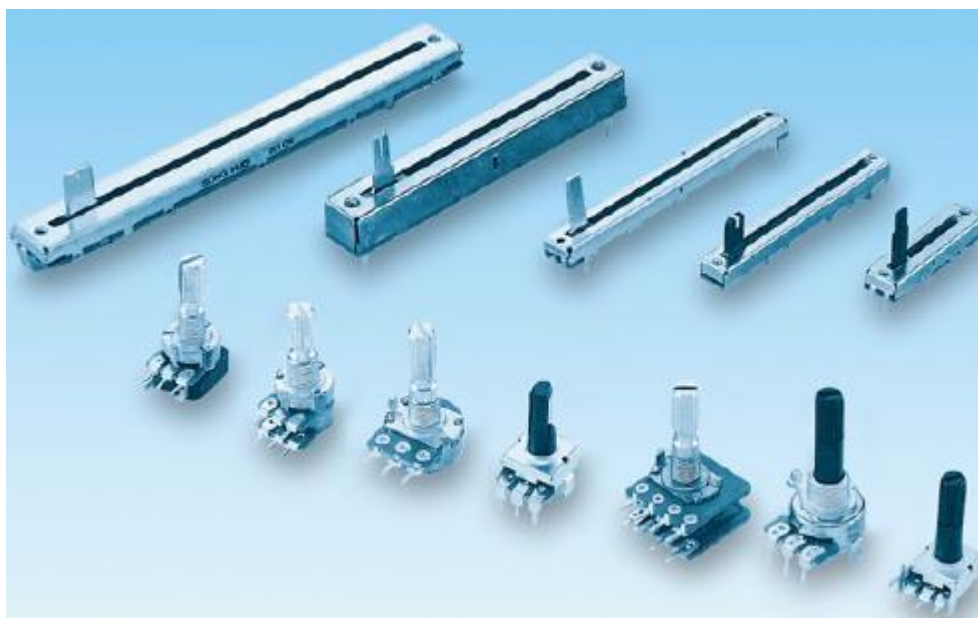


Fig. 37 – Potenziometri lineari

In figura 29 sono riportati dei potenziometri lineari, nei quali la tensione di uscita è legata linearmente a quella di ingresso attraverso un rapporto. Quest'ipotesi fa sì che si consideri la resistenza totale un resistore rettilineo di sezione S , lunghezza totale L_t e resistività ρ del tipo:

$$R_t = \rho \cdot \frac{L_t}{S}$$

In figura 30 (immagine a sinistra) è rappresentato lo schema elettrico del potenziometro con il cursore posizionato in un punto intermedio della resistenza. Il cursore poi chiude il circuito attraverso una resistenza di carico R_L .

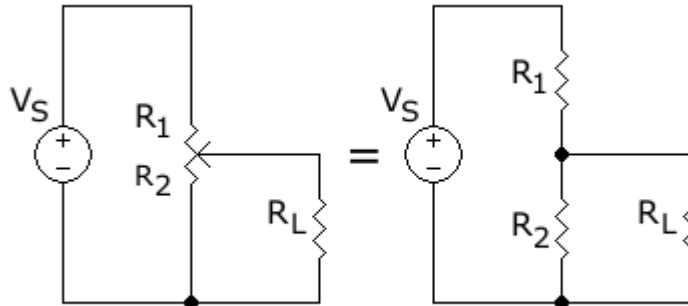


Fig. 38 – Potenziometri lineari

Il dispositivo risulta quindi essere equivalente ad una coppia di resistenze in serie (Figura 30 a destra) il cui valore totale è costante, ma singolarmente variabili in base allo spostamento del cursore. Le singole sezioni sono esprimibili in funzione della resistenza totale nel modo che segue:

$$R_t = R_1 + R_2$$

$$L_t = L_1 + L_2$$

$$R_1 = R_t \frac{L_1}{L_t} = R_t \frac{(L_t - L_2)}{L_t}$$

$$R_2 = R_t \frac{L_2}{L_t}$$

dove:

- R_1 è la resistenza del tratto in alto;
- R_2 è la resistenza del tratto in basso;
- R_t la resistenza totale;
- L_1 la lunghezza del tratto in alto;
- L_2 la lunghezza del tratto in basso;
- L_t la lunghezza totale del potenziometro.

Applicando una differenza di potenziale V alle estremità del potenziometro, per la legge di Ohm, si ottiene una corrente elettrica pari a:

$$I = \frac{V}{R_t}$$

dove V è la tensione applicata

Rimane verificata la condizione:

$$V = R_1 \cdot I + R_2 \cdot I$$

La tensione ai capi di R_L risulta essere, in prima grossolana approssimazione (considerando $R_L \gg R_2$) pari a:

$$V_2 = R_2 \cdot I = \rho \cdot \frac{L_2}{S} \cdot I$$

$$V_2 = \rho \cdot \frac{L_2}{S} \cdot \frac{V}{\rho \cdot \frac{L_1}{S} + \rho \cdot \frac{L_2}{S}}$$

Effettuando le semplificazioni si nota che tutto è esprimibile in funzione delle lunghezze dei tratti di resistori:

$$V_2 = V \cdot \frac{L_2}{L_t}$$

E' evidente che collegando il cursore al sensore a spostamento (ad esempio il tubo di Bourdon), il segnale di spostamento viene trasdotto in un segnale di tensione.

Analogamente, per un potenziometro isolato, vale la relazione:

$$R_2 = R_T \frac{L_2}{L_T}$$

Per cui il potenziometro traduce il segnale di spostamento in un valore di resistenza che deve essere misurata con appositi strumenti (v. par. seguente).

5.4.5.2 Sistemi per la misura delle resistenze

Il valore di una resistenza può essere misurato utilizzando 2 metodi principali:

- Metodo volt-amperometrico
- Metodo a ponte di Wheatstone

Ponte di Wheatstone

Il **ponte di Wheatstone** è un dispositivo elettrico che permette di misurare in modo preciso il valore di una resistenza elettrica.

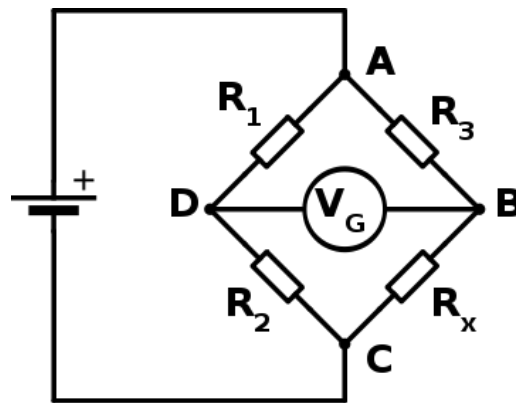


Fig. 39 – Ponte di Wheatstone

Si compone di un generatore di tensione che alimenta due rami resistivi posti in parallelo: il primo è composto da un resistore fisso campione (R_1) in serie a un resistore variabile (R_2) di elevata precisione, il secondo ramo è invece composto da un resistore campione in serie alla resistenza incognita. Si pone quindi un galvanometro o un voltmetro a zero centrale (in grado di misurare tensioni positive e negative) tra i due resistori del primo ramo e i due del secondo ramo. Alimentando quindi il circuito, si noterà, in generale, che il galvanometro segnala il passaggio di una corrente elettrica. Variando il valore della resistenza R_2 , varia la corrente che passa nel galvanometro (o la tensione misurata dal voltmetro).

Il galvanometro ha il pregio di essere estremamente sensibile (correnti dell'ordine del μA) ma è estremamente delicato e costoso. Si può sostituirlo con un voltmetro, sempre a zero centrale, purché quest'ultimo possa rilevare tensioni dell'ordine dei decimi di mV.

La condizione di equilibrio del ponte (tensione nulla misurata dal voltmetro) è la seguente:

$$R_2 \cdot R_3 = R_x \cdot R_1$$

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

Quindi conoscendo con precisione le 3 resistenze note del ponte, nella condizione di tensione nulla, si può calcolare la resistenza incognita R_x .

Il valore della forza elettromotrice (E) del generatore è ininfluenza per la determinazione del valore della misura.

La misura della resistenza si misura utilizzando la seguente procedura:

- si collega la resistenza incognita al ponte, eventualmente con cavi opportuni;
- si varia la resistenza R_2 fino all'azzeramento della tensione misurata dal volmetro
- si calcola la resistenza incognita con la formula:

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$$

Ponte di Wheatstone – schemi di collegamento

Nel caso di collegamenti della resistenza con cavi elettrici di lunghezza non trascurabile, si applicano i seguenti schemi:

- Collegamento a 2 fili

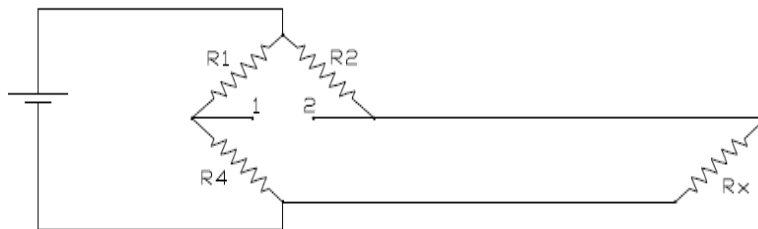


Fig. 40 – Ponte di Wheatstone - Collegamento a 2 fili

In questo tipo di connessione la lunghezza dei fili che collegano il sensore (R_x) al circuito di misura può essere elevata e ciò costituisce una resistenza aggiuntiva. Inoltre possono esservi gradienti termici lungo i fili: il ponte di Wheatstone è sensibile alle variazioni di resistenza che ne conseguono e la misura sarà alterata. La resistenza R^* misurata dal ponte sarà la somma della resistenza R_x e della resistenza dei cavi di collegamento

$$R^* = R_x + R_{\text{fili}}$$

Affinché la misura non sia disturbata occorre che $R_{\text{fili}} \ll R_x$, ma questo non è sempre facilmente ottenibile.

- Collegamento a 3 fili

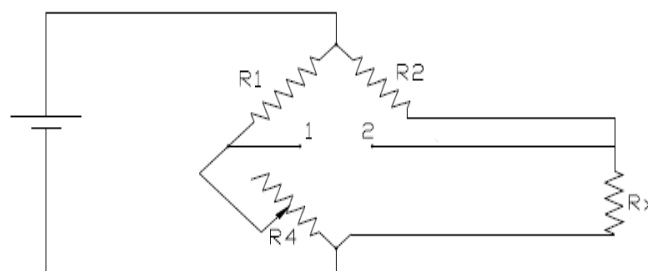


Fig. 41 – Ponte di Wheatstone - Collegamento a 3 fili

Tale configurazione risulta auto-compensata perché la resistenza dei fili di collegamento è connessa a due rami adiacenti del ponte. Sono quindi eliminate sia le variazioni di resistenza dovute alla lunghezza dei fili che quelle dovute ai gradienti termici.

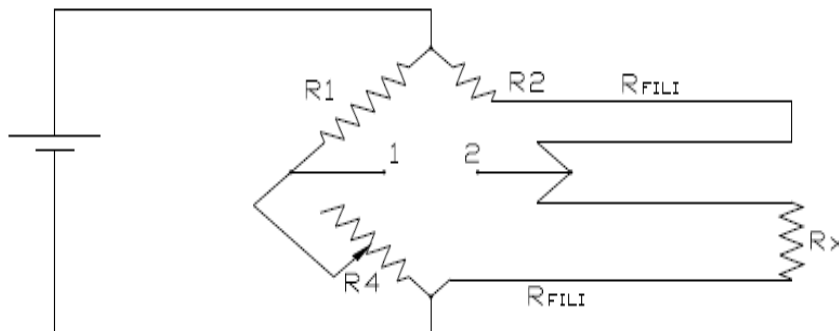
Detta R_{fili} la resistenza dei cavi la formula del ponte equilibrato diventa:

$$(R_x + R_{fili}) \cdot R_1 = (R_2 + R_{fili}) \cdot R_4$$

$$R_x = \frac{R_2 \cdot R_4 + R_{fili} \cdot (R_4 - R_1)}{R_1}$$

Se $R_4 = R_1$ il disturbo prodotto dai cavi viene annullato.

- Collegamento a 4 fili

**Fig. 42 – Ponte di Wheatstone - Collegamento a 4 fili**

In tale tipo di connessione due fili bilanciano la presenza dei fili di collegamento del trasduttore ma non sono collegati a nessun dispositivo; il loro percorso deve essere lo stesso di quello dei fili di collegamento.

Metodo Volt-Amperometrico

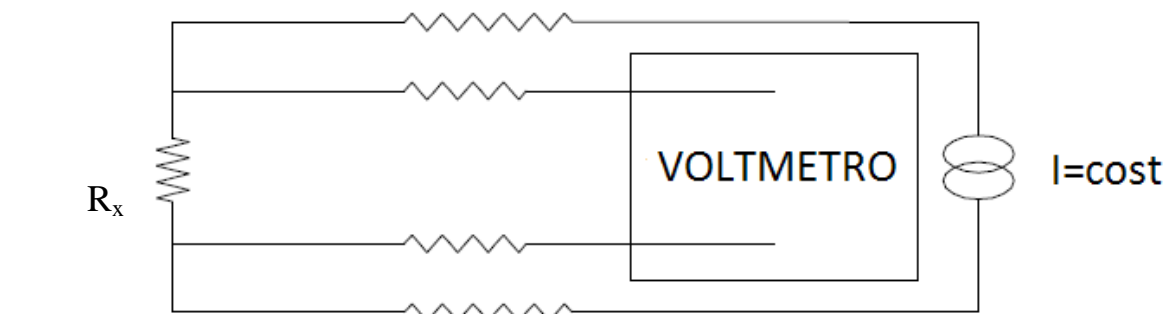


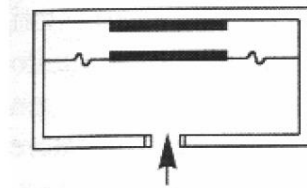
Fig. 43 – Metodo Volt-Amperometrico - Collegamento a 4 fili

Secondo questo metodo di misura la variazione di resistenza è misurata come caduta di potenziale che si ha nel trasduttore in seguito ad un passaggio di corrente d'intensità nota. Il circuito di misura è costituito da un generatore di corrente costante, un voltmetro e il trasduttore (fig.32). Le resistenze dei fili di collegamento non influiscono sulla misura poiché nel circuito di "alimentazione" si impone una corrente mentre nei collegamenti del voltmetro non circola corrente, quindi il voltmetro leggerà una tensione pari a: $E = R_x \cdot I$.

L'intensità di corrente è nota e costante, e si ricava facilmente R_x . Il legame tensione-resistenza in questo caso è lineare.

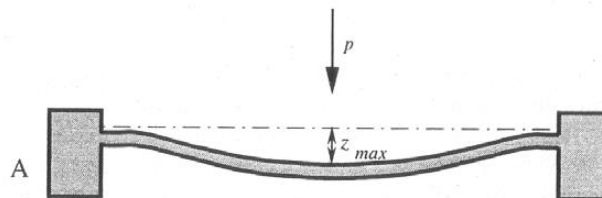
5.4.5.3 Trasduttori di tipo elettrico resistivo o piezoresistivi (Estensimetri)

Sono dei trasduttori secondari realizzati appositamente per i diaframmi.

**Fig. 44 – Schema di un sensore a diaframma**

Quando il diaframma circolare viene sottoposto ad una differenza di pressione, nasce una deflessione, in direzione normale al diaframma, proporzionale al valore di pressione (come già detto nei paragrafi precedenti. Nel caso di diaframmi a spessore costante la deflessione assume il valore (v. fig.44):

$$Z = \frac{3 \cdot \Delta P \cdot (1 - \nu^2) \cdot R_0^4}{16 \cdot E \cdot t^3}$$

**Fig. 45 – Deformazione del diaframma**

Contemporaneamente nascono delle deformazioni in direzione radiale e direzione circonferenziale, che vengono misurate attraverso estensimetri.

$$\varepsilon_r = \frac{3 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \Delta P}{8 \cdot E \cdot t^2} \cdot (R_0^2 - 3 \cdot r^2)$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{3 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \Delta P}{8 \cdot E \cdot t^2} \cdot (R_0^2 - r^2)$$

Con:

ΔP : Differenza di pressione tra le facce del diaframma

R_0 : Raggio della lamina

t : spessore del diaframma

r : raggio generico del diaframma

E : Modulo di Young del materiale

ν : Coefficiente di Poisson del materiale

Gli estensimetri sono costituiti da film sottili che variano la loro resistenza in funzione della deformazione. L'estensimetro viene incollato sulla struttura di cui si deve misurare la deformazione, oppure, come nel caso dei sensori di pressione, sono depositati per via chimica sul diaframma. Variando il diametro, lo spessore o il materiale del diaframma si varia la sensibilità del sensore.

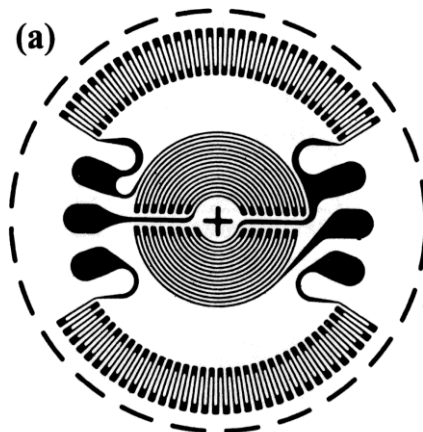


Fig. 46 – Estensimetri su diaframma

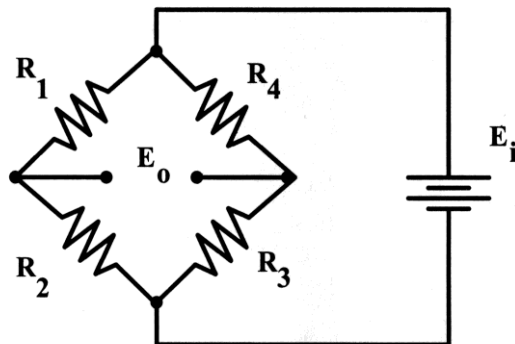


Fig. 47 – Schema del ponte di Wheatstone utilizzato

Nello schema gli estensimetri R_1 ed R_3 rilevano la deformazione circonferenziale, mentre gli estensimetri R_2 ed R_4 misurano la deformazione radiale.

Il ponte è inizialmente equilibrato ($E_0 = 0$), ma alla comparsa della deformazione il ponte si squilibra. Il valore di E_0 è legato alla pressione dalla formula:

$$E_0 = 0.82 \cdot \frac{\Delta P \cdot (1 - \nu^2) \cdot R_0^2}{E \cdot t^2} \cdot E_i$$

Dove E_i è la tensione di alimentazione del ponte.

Da non confondere con gli estensimetri di tipo resistivo, i sensori piezoresistivi funzionano su un principio fisico leggermente differente, anche se ne condividono molto la struttura, la modalità d'utilizzo e i campi d'applicazione degli estensimetri tradizionali. Storicamente nascono come tecnologia alternativa ai classici estensimetri, tanto che in alcuni casi sono citati come estensimetri a semiconduttore.

In particolare bisogna chiarire che, al manifestarsi di una deformazione, i sensori piezoresistivi variano la propria resistenza principalmente perché varia la resistività del materiale sensibile, mentre gli estensimetri resistivi variano la propria resistenza quasi esclusivamente perché varia la lunghezza e la sezione del conduttore che realizza il sensore.

I punti di forza di questi sensori sono nella possibilità di produrli in larga scala in modo economico, nell'elevata sensibilità e nelle dimensioni. Mentre i punti critici sono legati alla deriva termica e alla loro linearità. Questo ne fa uno dei sensori più in uso sui trasduttori "miniaturizzati" o "standard economici", non destinati ad applicazioni ad alta precisione. Oggi i sensori piezoresistivi trovano larga applicazione negli accelerometri, nelle celle di carico e nei traduttori di pressione.

Nelle due figure seguenti è riportato una parte del "Data Sheet" di un sensore di pressione estensimetrico (resistivo). Nella prima figura sono riportate le caratteristiche generali del sensore, nella seconda, tra l'altro, gli schemi di connessione elettrica per una uscita in tensione ed una in corrente (4-20mA).

GEFRAN**TPSA**

TRASMETTITORE DI PRESSIONE DI PRECISIONE

**Principali caratteristiche**

- Campi di misura da: 0...50 bar a 0...1000 bar (0...750psi a 0...15000psi)
- Accuratezza: $\pm 0,1\%$ FSO tipico
- Segnale di uscita in tensione o corrente
- Classe di protezione: IP65/IP67
- Materiale a contatto con fluido 17-4PH
- Temperatura operativa -40...+105°C

I trasmettitori della serie TPSA sono basati sul principio di misura estensimetrico.

La struttura meccanica rende insensibile il sensore in fase di montaggio e serraggio.

Questo trasmettitore è idoneo in tutte quelle applicazioni dove oltre alla robustezza è necessaria una elevata accuratezza.

CARATTERISTICHE TECNICHE

| | TENSIONE | CORRENTE |
|---|--|-----------------|
| Segnale di uscita | | |
| Accuratezza (1) | $\pm 0,1\%$ FSO tipico; $\pm 0,15\%$ FSO max $\geq 100\text{bar}/1500\text{psi}$ $\pm 0,15\%$ FSO tipico; $\pm 0,25\%$ FSO max $< 100\text{bar}/1500\text{psi}$ | |
| Risoluzione | Infinita | |
| Sovrapressione (senza degrado) (2) | Vedi tabella | |
| Resistenza allo scoppio (3) | Vedi tabella | |
| Parti a contatto con il processo | Acciaio INOX 17-4PH | |
| Materiale custodia esterna | Acciaio INOX AISI 304 e Nylon 66GF35V0 | |
| Tensione di alimentazione | C/N/Q 18...32Vdc B/M/P/R 12...32Vdc | E 10...30Vdc |
| Sensibilità all'alimentazione | $< 0,0015\%$ FSO/V | |
| Resistenza isolamento | $> 1000\text{ M}\Omega$ a 50Volt | |
| Segnale di uscita a zero | B, C, M, N, P, Q, R | 4mA (E) |
| Segnale di uscita a fondo scala | B, C, M, N, P, Q, R | 20mA (E) |
| Assorbimento max. sull'alimentazione | $< 30\text{mA}$ | $< 32\text{mA}$ |
| Carico max. ammissibile | 1mA | vedi diagramma |
| Stabilità a lungo termine | $< 0,1\%$ FSO/Anno | |
| Campo temperatura operativo (processo) | -40...+105°C (-40...+221°F) | |
| Campo temperatura compensato | -10...+85°C (14...+185°F) | |
| Campo temperatura di stoccaggio | -40...+125°C (-40...+257°F) | |
| Effetti della temperatura nel campo compensato (zero-span) | $\pm 0,008\%$ FSO/°C tipico ($\pm 0,015\%$ FSO/°C max.) | |
| Tempo di risposta (10...90%FSO) | $< 1\text{ msec.}$ | |
| Tempo di avvio | $< 500\text{ msec.}$ | |
| Effetti posizione di montaggio | Trascurabili | |
| Umidità | Fino a 100%RH senza condensa | |
| Peso | 110 gr. circa | |
| Shock meccanico | 100 g / 1 msec. secondo IEC 68-2-6 | |
| Vibrazioni | 20 g max a 15-2000Hz secondo IEC68-2-6 | |
| Classe di protezione | IP65/IP66/IP67 | |
| Protezione cortocircuiti uscita e inversione polarità alimentazione | SI | |

FSO = Full Scale Output

1 Metodo BFSL (Best Fit Straight Line) include gli effetti combinati di non linearità, isteresi e ripetibilità

2 testato per più di 1000 colpi con singola durata $< 2\text{msec.}$

3 testato per più di 100 colpi con singola durata $< 2\text{msec.}$

| CAMPI DI MISURA (Bar) | 50 | 100 | 160 | 200 | 250 | 350 | 400 | 500 | 600 | 700 | 1000 |
|--|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Max. pressione applicabile (senza degrado) | 150 | 300 | 480 | 600 | 750 | 1050 | 1200 | 1500 | 1800 | 2000 | 2000 |
| Resistenza allo scoppio | 250 | 500 | 800 | 1000 | 1250 | 1750 | 2000 | 2500 | 2500 | 2500 | 2500 |

Fig. 48 – Caratteristiche generali del trasmettitore di pressione

CONNESSIONI ELETTRICHE - Connettori

P - Connettore 7 poli

Connettore maschio 09-127-09-07
Grado di protezione IP67

V - Connettore 6 poli

Connettore maschio VPT02A10-6PT2
Grado di protezione IP66

F - Cavo 2 poli

Cavo schermato 2x0,25 - 2m. (uscita E)
Grado di protezione IP65

Z - Connettore maschio 4 poli M12 x 1

Connettore maschio 4 poli serie 713
Grado di protezione IP67

E - Conn. 4 poli Elettrovalvola
M - Conn. 4 poli Microlettrovalvola

Elettrovalvola DIN 43650A - ISO4400
Grado di protezione IP65
micro Elettrovalvola DIN 43650C - ISO4400
Grado di protezione IP65

F - Cavo 4 poli

Cavo schermato 4x0,25 - 2m
Grado di protezione IP65

CONNESSIONI ELETTRICHE - schemi di collegamento

USCITA AMPLIFICATA IN TENSIONE - mod. B/C/M/N/P/Q/R

| | cod. V | cod. P | cod. F | cod. E/M | cod. Z |
|-----------------|----------|----------|---------------|----------|--------|
| REGOLATORE | C | 1 | Bianco | 3 | 3 |
| ALIMENTAZIONE + | D | 2 | Verde | 2 | 2 |
| AMPLIFICATORE | A | 3 | Rosso | 1 | 1 |
| USCITA + | B | 4 | Giallo o Nero | 2 | 2 |
| USCITA - | | | | | |
| ⊥ | Custodia | Custodia | Schermo | ⊕ | N.C. |

USCITA AMPLIFICATA IN CORRENTE - mod. E

| | cod. V | cod. P | cod. F | cod. E/M | cod. Z |
|-----------------|----------|----------|---------------|----------|--------|
| REGOLATORE | A | 3 | Rosso | 1 | 1 |
| ALIMENTAZIONE + | B | 4 | Giallo o Nero | 2 | 2 |
| SEGNALE | | | | | |
| AMPLCONV | | | | | |
| ⊥ | Custodia | Custodia | Schermo | ⊕ | N.C. |

DIAGRAMMA DI CARICO (Uscita corrente)

ACCESSORI A RICHIESTA

| | |
|--|---|
| <p>Connettori</p> <p>Connessione E Connettore 3 poli + terra DIN43650A ISO4400 Prot. IP65 CON 006</p> <p>Connessione Z Connettore 4 poli Prot. IP67 CON 293</p> | <p>Connessione M Connettore 3 poli + terra DIN43650C ISO4400 Prot. IP65 CON 008</p> <p>Connessione P Connettore da cavo femmina Prot. IP67 CON 321</p> <p>Connessione V Connettore da cavo femmina Prot. IP66 CON 300</p> |
|--|---|

CAVI DI ESTENSIONE

| | | |
|---|--------------------|--|
| Connettore 6 poli con cavo di lunghezza 8 metri (25 ft) | C08WLS | |
| Connettore 6 poli con cavo di lunghezza 15 metri (50 ft) | C15WLS | |
| Connettore 6 poli con cavo di lunghezza 30 metri (100 ft) | C30WLS | |
| Altre lunghezze | a richiesta | |

| Cod. colore cavo | |
|------------------|-------------|
| Conn. | Filo |
| A | Rosso |
| B | Giallo/Nero |
| C | Bianco |
| D | Verde |
| E | Blu |
| F | Arancio |

Fig. 49 – Schemi di connessione del trasmettitore di pressione

Nella figura seguente sono riportati due trasmettitori (ed indicatori) di pressione differenziale con sensore resistivo (diaframma) in acciaio inox e silicone come fluido di riempimento.



Fig. 50 – Trasmettitori di pressione differenziale

5.4.5.4 Trasduttori di tipo elettrico induttivo (Trasformatori differenziali o LVDT)

Tale tipo di trasduttore di spostamento è costituito da un trasformatore variabile differenziale lineare composto da un avvolgimento principale, due avvolgimenti secondari ed un nucleo magnetico (v. fig. 37). Il nucleo è collegato al sistema di cui si deve misurare lo spostamento.

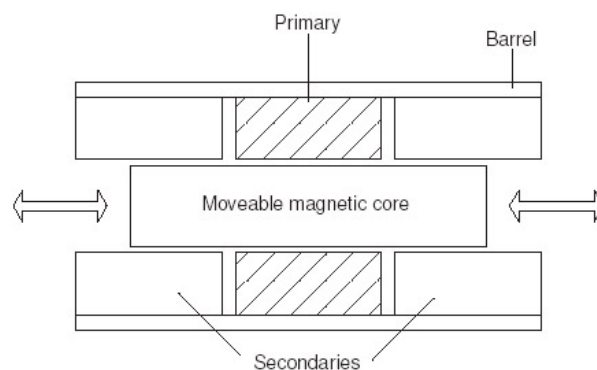


Fig. 51 – Struttura del trasformatore variabile differenziale

Quando l'avvolgimento primario viene alimentato, negli avvolgimenti secondari viene prodotta una corrente proporzionale alla posizione del nucleo. Questo fa sì che l'informazione sulla posizione venga trasformata in segnale elettrico.

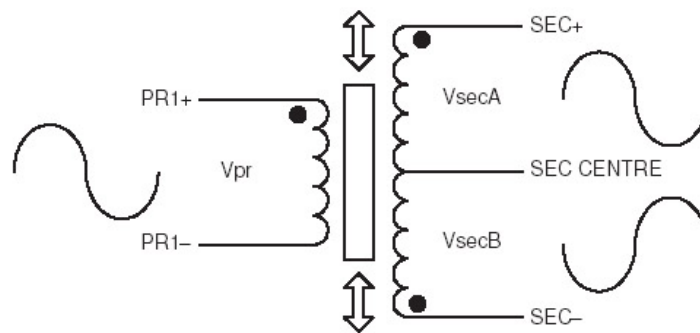


Fig. 52 – Schema elettrico del trasformatore variabile differenziale

I trasformatori differenziali lineari sono costituiti, come si può vedere nella figura sopra, da un trasformatore con due secondari uguali e simmetrici collegati in “controfase” l’uno rispetto all’altro. L’accoppiamento tra il primario e i secondario dipende dalla posizione del nucleo mobile di materiale ferromagnetico. Quando il nucleo si trova nella posizione centrale, la differenza di tensione in uscita dai due secondari è nulla.

L’LVDT (linear variable differential transformer) ed il suo apposito amplificatore di segnale, sono progettati per essere utilizzati con la stessa facilità di un comune potenziometro lineare ma con vantaggi non indifferenti in termini di:

- precisione
- basso attrito del sensore
- risoluzione infinita
- possibilità di operare a temperature anche elevate

Il trasformatore LVDT è utilizzato per misurare direttamente uno spostamento lineare o rotante. Indirettamente viene utilizzato per misurare parametri come forza o pressione. I trasformatori di tipo LVDT sono disponibili in un range che può variare da pochi millimetri ad alcuni metri.

Il Trasformatore Variabile Differenziale Lineare deve essere alimentato da una tensione a corrente alternata che produce una tensione secondaria sempre a corrente alternata. Il rapporto tra i due valori viene utilizzato per determinare lo spostamento del nucleo e ricavare quindi il parametro cercato. La tensione secondaria che viene generata, infatti, varia a seconda della posizione del nucleo montato sullo stantuffo.

Nella figura seguente è riportato un “Data Sheet” di un LVDT di piccole dimensioni. Tale LVDT richiede uno strumento di alimentazione e condizionamento del segnale.

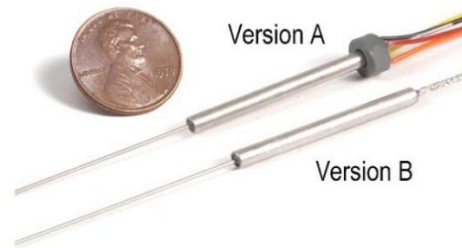
SM Series LVDT 2.3 mm diameter



This micro-miniature LVDT is designed for high resolution position measurement in tight places. It is layer wound on metal coil-form provides excellent stability, while ferromagnetic housing takes care of the electromagnetic and electrostatic shielding

Several options are available for signal conditioning: digital or analog EL-35 signal conditioners and USB-10 or USB-10-4 digital controllers, manufactured by Singer Instruments & Control.

Different versions of this LVDT can be manufactured by request.



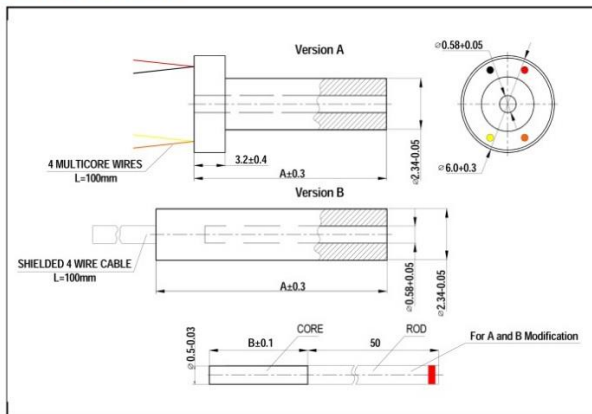
Specification

- Input voltage 2.3Vrms max
- Input Frequency 5kHz (nominal)
- Linearity deviation error 2.0% F. R. max
- Operating temperature range -20°C to +70°C
- Housing material Nickel-Iron Alloy.

Applications:

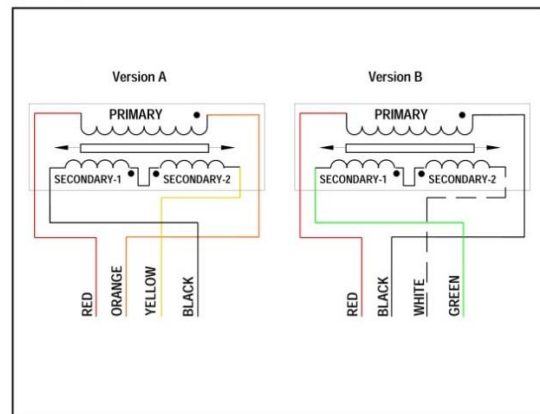
- ✓ robotic systems - miniature control elements;
- ✓ miniature sensors - force, torque, joint movements;
- ✓ optical components - linear/angular position;
- ✓ medical use - micro motion, deformation.

Dimensions (mm):



Notes
LVDT core is supplied together with welded connecting rod.
Non magnetic side is labeled with red mark

Wiring



How to order
Ordering example:
Model number: LVDT SM – 7.0A-3m (supplied with 3 meter long connecting wires.)

| TYPE | Linear Range | Sensitivity (tested at 5kHz) | Impedance (tested at 5kHz) | | Resistance | | Length | |
|---------|--------------|------------------------------|----------------------------|----------|------------|------|--------|------|
| | | | mm | V/mm/Vex | Ω | | mm | |
| | | | Prim. | Sec. | Prim. | Sec. | A | B |
| SM-1.0A | ±1.0 | 0.07 | 190 | 50 | 115 | 45 | 10.0 | 6.5 |
| SM-1.0B | | | | | | | 18.0 | |
| SM-2.5A | ±2.5 | 0.044 | 310 | 70 | 170 | 65 | 17.5 | 11.0 |
| SM-2.5B | | | | | | | 25.5 | |
| SM-5.0A | ±5.0 | 0.044 | 170 | 70 | 90 | 60 | 27.5 | 17.0 |
| SM-5.0B | | | | | | | 35.5 | |
| SM-7.0A | ±7.0 | 0.029 | 205 | 90 | 130 | 80 | 35.0 | 19.5 |
| SM-7.0B | | | | | | | 43.0 | |
| SM-8.5A | ±8.5 | 0.02 | 240 | 110 | 165 | 100 | 43.0 | 26.2 |
| SM-8.5B | | | | | | | 51.0 | |

Rev. K © Singer Instruments & Control Ltd., 2009 WWW.SINGER-INSTRUMENTS.COM

Information furnished by Singer Instruments & Control is believed to be accurate and reliable. However, no responsibility is assumed by Singer Instruments & Control for its use, nor for any infringements of patents or other rights of third parties, which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of Singer Instruments & Control Ltd.

Singer Instruments & Control Ltd.

2 Yozma St., Tirat Carmel 39032, ISRAEL
yuval@singer-instruments.com
540 East Main St., Branford, CT 06405, USA
fred@singer-instruments.com

Tel: 972-4-857-8880
Fax: 972-4-857-8881
Tel: 203-481-7278
Fax: 203-488-7190

Fig. 53 – Sensore LVDT

5.4.5.5 Trasduttori di spostamento di tipo elettrico capacitivo

Nei trasduttori di pressione a diaframma trovano anche impiego sensori capacitivi, nei quali il diaframma costituisce una delle due armature di un condensato piano, mentre l'altra armatura è affacciata alla prima sostenuta da un supporto non soggetto a deformazione (v. fig. 54). Nella figura di sinistra è riportato lo schema di uno strumento per la misura della pressione relativa, mentre nella figura di destra è riportato lo schema di uno strumento per la misura della pressione assoluta.

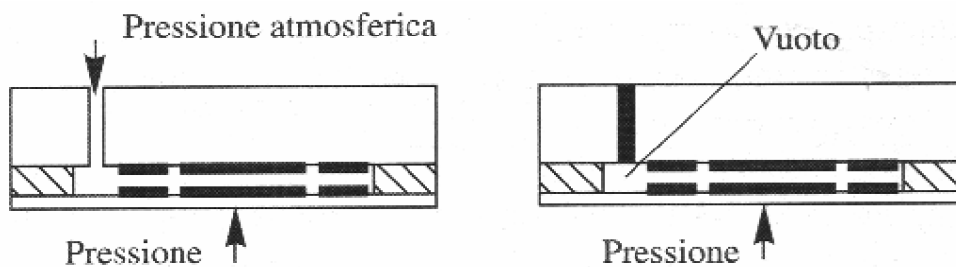


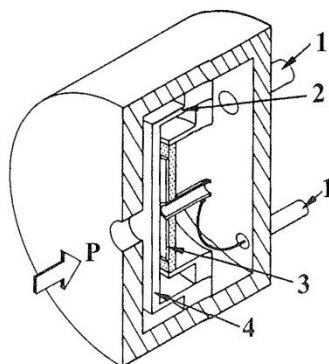
Fig. 54 – Diaframma con trasduttore capacitivo

La pressione applicata al sensore deforma la lamina e varia la distanza tra le due armature del condensatore, determinando così la variazione della capacità del condensatore. La capacità C di un condensatore piano è definita dalla formula:

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 A / d$$

- A = area delle armature
- ϵ_r = costante dielettrica del mezzo
- ϵ_0 = costante dielettrica del vuoto
- d = distanza fra le armature

In figura 55 è riportata una vista in sezione di un trasduttore di pressione capacitivo.



Trasduttore capacitivo di pressione: (1) pressione di riferimento; (2) supporto del diaframma; (3) armatura del condensatore e (4) diaframma.

Fig. 55 – Sensore capacitivo di pressione

Per la misura della variazione della capacità si fa uso del ponte di Wheatstone alimentato a tensione alternata, concettualmente simile al ponte alimentato a tensione continua ma in cui le resistenze sono sostituite da impedenze e capacità. (v, Figura 56).

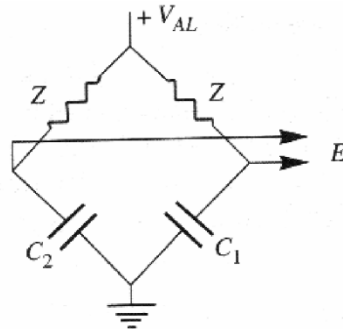


Fig. 56 – Ponte di Wheatstone alimentato a tensione alternata

5.4.5.6 Posizionamento dei trasduttori di pressione (a diaframma)

Il diaframma sensibile può essere posizionato nel condotto interponendo o meno un vano tra il trasduttore ed il fluido (v, Fig, 57). La presenza di un volume morto modifica il comportamento dinamico del trasduttore a causa del contributo inerziale del fluido presente nel volume morto e può costituire un punto di accumulo di particolato. D'altro canto il volume morto protegge la risposta dal sensore da rapide variazioni di temperatura e riduce la sensibilità alle vibrazioni prodotte da cause fluidodinamiche.

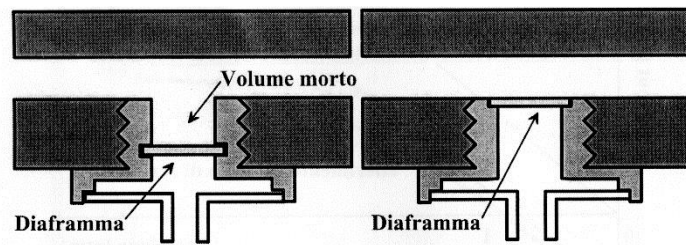


Fig. 57 – Posizionamento del diaframma

Nei casi in cui il trasduttore di pressione debba operare in condizioni critiche dovute a liquidi corrosivi, si preferisce inserire diaframmi di protezione particolarmente cedevoli in modo da isolare l'elemento elastico ed evitare così la sua l'interazione diretta con il fluido da esaminare (v. Fig. 58).

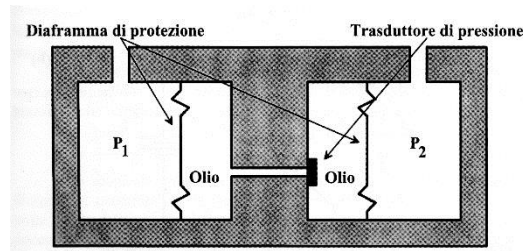


Fig. 58 – Trasduttore di pressione con diaframma isolato dal fluido

6 SENSORI PER LA MISURA DELLA TEMPERATURA

Prima di introdurre i sensori per la misura della temperatura è necessario precisare che il sensore è, di solito, costituito da un corpo inserito nel sistema di cui si vuol conoscere la temperatura; non è detto, quindi, che la temperatura del sensore coincida con quella del sistema.

Quando si introduce un sensore in un sistema per misurarne la temperatura, occorre tener presente che la trasmissione di calore tra sistema e sensore non è istantanea; l'energia trasferita è, in genere, sottratta o ceduta al sistema.

La trasmissione di calore tra sensore e sistema è descritta dalla relazione:

$$\Phi(t) = hS(\bar{T} - T(t))$$

Essendo:

$\Phi(t)$ = quantità di calore che passa dal sistema al sensore nell'unità di tempo

h = coefficiente di scambio termico

S = superficie del sensore

\bar{T} = temperatura del sistema in misura

$T(t)$ = temperatura del sensore

La temperatura del sensore $T(t)$ è legata alla quantità di calore scambiata con il sistema anche dalla relazione:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{1}{mc} \Phi(t)$$

dove m è la massa del sensore e c il suo calore specifico.

Sostituendo la prima equazione nella seconda e separando le variabili si ottiene:

$$\frac{dT(t)}{dt} = \frac{hS}{mc} (\bar{T} - T(t)) \quad \Rightarrow \quad \frac{dT(t)}{\bar{T} - T(t)} = \frac{hS}{mc} dt \quad \Rightarrow \quad -\frac{d(\bar{T} - T(t))}{\bar{T} - T(t)} = \frac{hS}{mc} dt$$

integrando tra l'istante $t=0$ (dove la temperatura del sensore vale T_0 , temperatura del sensore al momento dell'inserimento nel sistema) ed il generico istante t , si ottiene:

$$\ln(T(t) - \bar{T}) - \ln(T_0 - \bar{T}) = -\frac{hS}{mc} (t - 0)$$

ponendo, poi, $\tau = mc/hS$ (costante di tempo del sensore) e ricavando la temperatura del sensore $T(t)$, si ha

$$T(t) = \bar{T} + (T_0 - \bar{T}) e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Si noti che, data l'espressione di $T(t)$, questa non potrà mai essere uguale a \bar{T} (l'uguaglianza si verifica solo per un tempo infinito) e che la temperatura si avvicinerà tanto più velocemente a quella del sistema quanto minore è la sua costante di tempo τ .

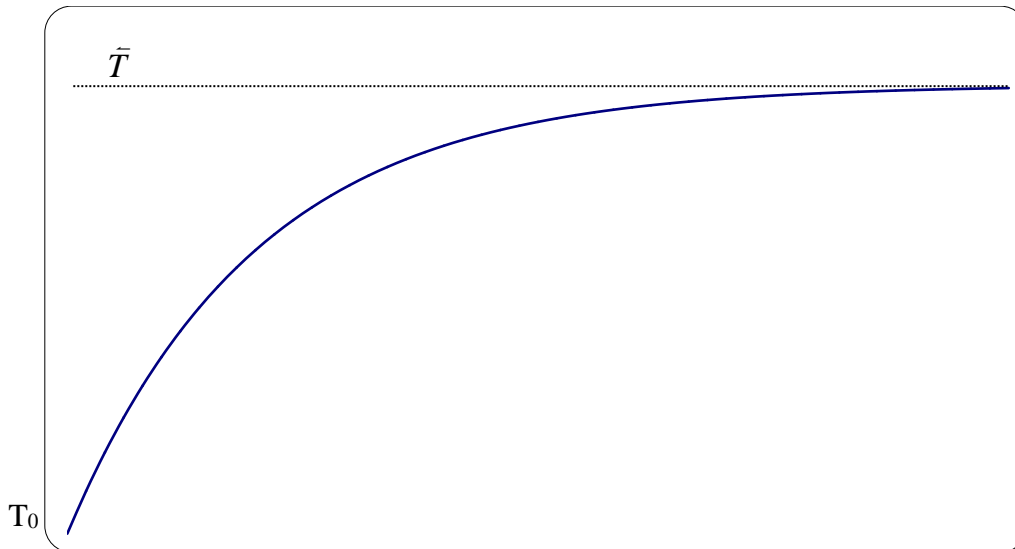


Fig. 59 – Andamento, nel tempo, della temperatura del sensore immerso in un sistema

Dall'espressione della costante di tempo si ricava:

$$\tau = \frac{mc}{hS} = \frac{\rho Vc}{hS} = \frac{V}{S} \frac{\rho c}{h}$$

il rapporto V/S tra volume e superficie del sensore è detto “coefficiente di forma” del sensore, mentre il secondo termine del prodotto (densità x calore specifico/coefficiente di scambio) è detto “diffusività termica”.

È quindi chiaro che le misure di temperatura sono sempre affette di errori.

6.1 Sensori basati su variazioni dimensionali

Tutti i corpi, se assoggettati ad una variazione di temperatura, subiscono una variazione di volume espressa dalla relazione:

$$\frac{\delta V}{V} = \alpha_v \delta T$$

Essendo V il volume del corpo, α_v un parametro caratteristico del materiale che lo costituisce detto coefficiente di dilatazione termica volumetrico, δT la variazione di temperatura e δV la variazione di volume conseguente.

Per i solidi, si può esprimere la variazione della lunghezza in modo analogo:

$$\frac{\delta L}{L} = \alpha_l \delta T .$$

Essendo L la lunghezza del corpo, α_l è detto coefficiente di dilatazione termica lineare del materiale, δT la variazione di temperatura e δL la variazione di lunghezza conseguente.

Nel caso di materiali isotropi (ciò che si comportano alla stessa maniera in tutte le direzioni) la relazione tra α_l ed α_v può essere ricavata osservando che dalle due equazioni si ottiene:

$$V_{(T)} = V_{(T_0)} [1 + \alpha_v (T - T_0)] \quad L_{(T)} = L_{(T_0)} [1 + \alpha_l (T - T_0)]$$

applicando la seconda equazione alle tre dimensioni lineari del solido si ha:

$$V_{(T)} = L'_{(T_0)} L''_{(T_0)} L'''_{(T_0)} = V_{(T_0)} [1 + \alpha_l (T - T_0)]^3$$

per cui:

$$[1 + \alpha_v (T - T_0)] = [1 + \alpha_l (T - T_0)]^3$$

sviluppando si ha:

$$\alpha_v = 3\alpha_l + 3\alpha_l^2 (T - T_0) + \alpha_l^3 (T - T_0)^2$$

Si vede, quindi che il legame tra α_v ed α_l è funzione della differenza di temperatura; se però, come di solito avviene nella realtà, α_l assume un valore molto inferiore ad 1 e la variazione di temperatura è limitata, i termini successivi al primo possono essere trascurati e quindi si può assumere:

$$\alpha_v \approx 3\alpha_l$$

Questa proprietà dei corpi viene ampiamente utilizzata per realizzare sensori di temperatura, sia con solidi che su liquidi ed anche gas.

6.1.1 Lamine bimetalliche

Si tratta di una lamina costituita da due metalli con diversi coefficienti di dilatazione termica. Esse sfruttano la variazione di lunghezza con la temperatura.

Quando la temperatura è diversa da quella a cui l'elemento è stato assemblato, il materiale con maggiore coefficiente tenderebbe a dilatarsi maggiormente dell'altro ma viene, da questo, mantenuto compresso, mentre il secondo, di conseguenza è mantenuto in trazione.

Come risultato la lamina si incurva dalla parte del materiale che ha minore coefficiente di dilatazione termica.

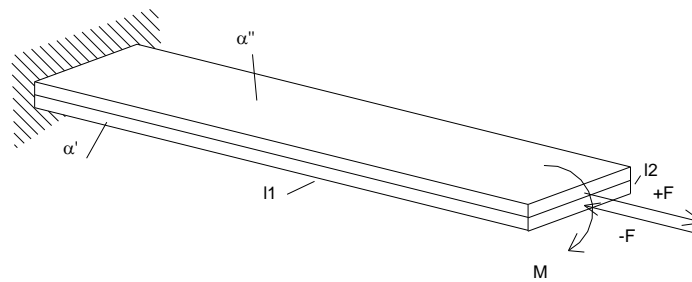
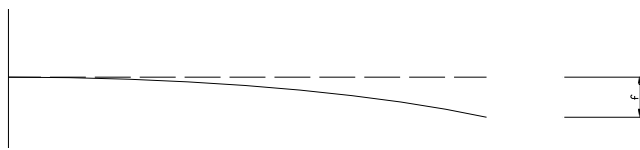


Fig. 60 – Lamina bimetallica incastrata ($\alpha' < \alpha''$)

Lo spostamento dell'estremità della lamina è dato dalla relazione:



$$f = \frac{3 l_1^2}{4 l_2} (\alpha' - \alpha'') \delta T$$

È evidente che per ottenere spostamenti apprezzabili l_1 deve essere abbastanza lungo; per questo la lamina assume, spesso la forma di una spirale.

Questi strumenti si mostrano abbastanza precisi ($\pm 1\%$) nel range della temperatura ambiente ($0 \div 40^\circ\text{C}$), ma mantengono una caratteristica lineare tra -20 e 200°C e possono essere utilizzati anche fino a 500°C , però con caratteristica non lineare.

Le lamine bimetalliche hanno il pregio di sviluppare forze apprezzabili, sufficienti, ad esempio, per l'azionamento di dispositivi di regolazione automatica, quali, ad esempio, i termostati.

In quest'ultimo caso si preferisce, però la soluzione a doppio incastro.

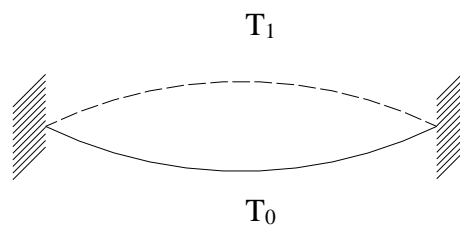


Fig. 52 – Lamina bimetallica a doppio incastro (termostato)

6.1.2 Termometro a liquido

È lo strumento di misura della temperatura più noto, soprattutto nel caso si utilizzi mercurio come liquido; possono, comunque, essere utilizzati anche altri liquidi (ad esempio alcol).

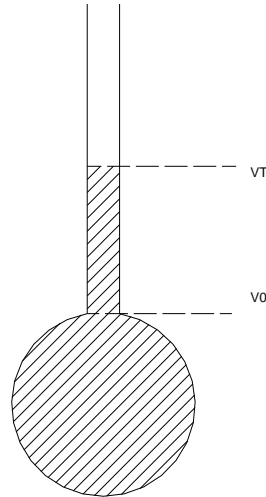


Fig. 53 – Termometro a liquido

È costituito da un bulbo che contiene il fluido, sormontato da un sottile tubicino.

La variazione di volume del liquido, al variare della temperatura, è dato, come detto, dalla:

$$V_{(T)} = V_{(T_0)} [1 + \alpha_v (T - T_0)]$$

Pertanto la variazione di altezza di liquido nel tubo è pari a:

$$\Delta h = \frac{V_{(T)} - V_{(T_0)}}{S} = \frac{V_{(T_0)} \alpha_v}{S} (T - T_0)$$

Essendo S la superficie del tubo.

Occorre, però, tener presente che anche il recipiente si dilata con la temperatura, per cui:

$$V_{R(T)} = V_{R(T_0)} [1 + \alpha_{rv} (T - T_0)]$$

per cui la variazione di altezza diviene:

$$\Delta h = \frac{V_{(T)} - V_{(T_0)} - V_{R(T)} + V_{R(T_0)}}{S_{(T)}} = \frac{V_{(T_0)} \alpha_v (T - T_0) + V_{R(T_0)} \alpha_{rv} (T - T_0)}{S_{(T)}} = \frac{V_{(T_0)} (\alpha_v + \alpha_{rv}) (T - T_0)}{S (1 + \alpha_{rl} (T - T_0))^2}$$

6.1.3 Termomanometro a liquido (a tubo di Bourbon)

Nell'ipotesi di un liquido monometrico in cui le variazioni dimensionali dovute alla pressione siano trascurabili rispetto a quelle dovute alla temperatura, si consideri uno strumento formato da un bulbo, un sottile tubo di collegamento ed un manometro a tubo di Bourbon; il tutto, ovviamente, riempito con liquido monometrico (di solito mercurio o alcol etilico).

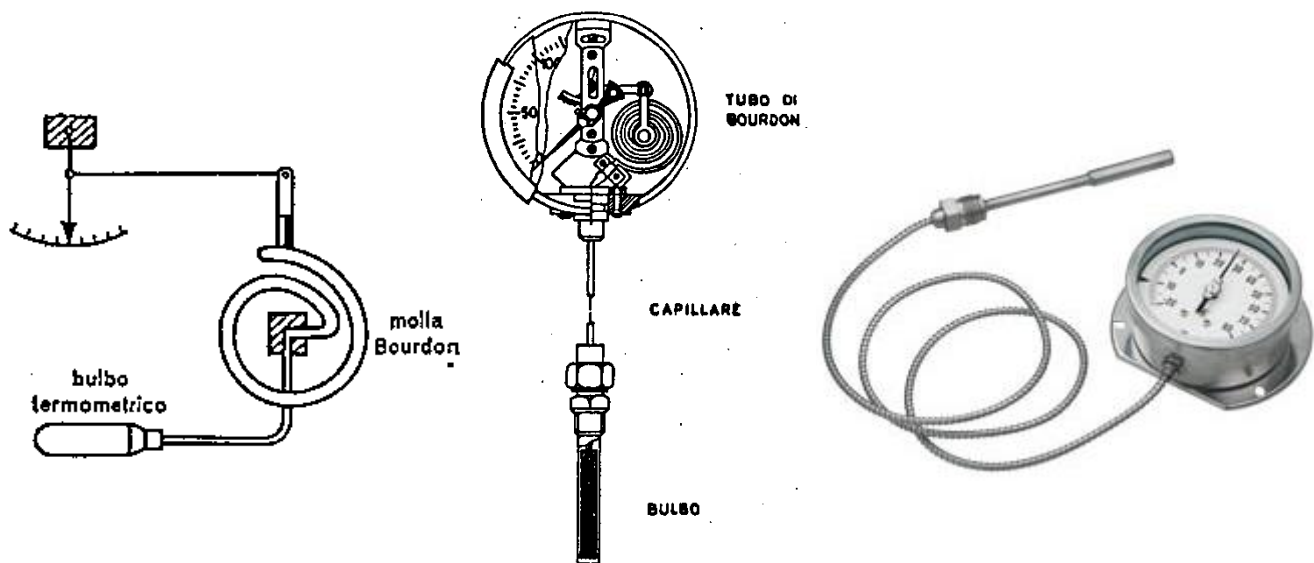


Fig. 54 – Termomanometro a liquido

Al variare della temperatura, il liquido si dilaterà fino a deformare il tubo di Bourdon.

La scala che si ottiene è praticamente lineare:

$$\delta p_s \propto \delta T$$

6.1.4 Termometro a gas

In questo caso si usa la legge dei gas perfetti:

$$pV=nRT \quad [T \rightarrow ^\circ\text{K}]$$

Se si scelgono materiali realizzativi per il recipiente che contiene il gas con coefficiente di dilatazione termica trascurabile, si può supporre

$$V_{(T)} \approx V_0 \quad (\text{almeno nell'intorno di } T_0)$$

per cui si ottiene:

$$\frac{p_0}{T_0} = \frac{p}{(T_0 + \delta T)}$$

$$\delta T = T_0 \left(\frac{p}{p_0} - 1 \right)$$

Se il coefficiente di dilatazione termica del recipiente non fosse trascurabile si otterrebbe una relazione non lineare tra pressione e temperatura a partire dalla:

$$\frac{p_0 v_0}{T_0} = \frac{pv}{(T_0 + \delta T)} = \frac{pv_0(1 + \alpha_v \delta T)}{(T_0 + \delta T)}$$

6.2 Sensori basati su effetti termoelettrici

Le proprietà termoelettriche dei materiali sono, spesso, fortemente dipendenti dalla temperatura; questo consente di realizzare i sensori di temperatura descritti nel presente paragrafo.

6.2.1 Termocoppie

La termocoppia è un trasduttore intrinsecamente semplice, costituito da 2 fili di materiale metallico diverso posti a contatto, che sfrutta il principio fisico osservato per la prima volta da Seebeck nel 1821. Tale effetto è generato dalla diffusione di elettroni attraverso l'interfaccia dei 2 metalli. Poiché l'intensità della diffusione degli elettroni dipende dalla temperatura della giunzione, il potenziale elettrico sviluppato fornisce una indicazione della temperatura stessa.

Il potenziale elettrico sviluppato viene misurato utilizzando una seconda giunzione e rilevando la differenza di potenziale E_0 su di un ramo del circuito.

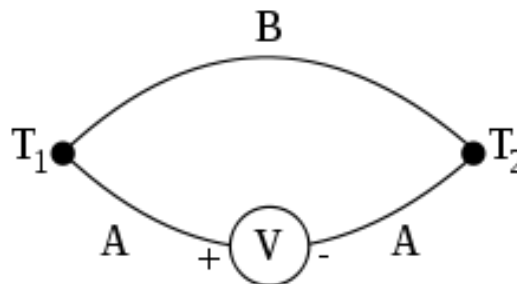


Fig. 55 – Rappresentazione circuitale di una termocoppia

Nell'uso corrente le termocoppie vengono impiegate nel campo in cui la differenza di potenziale varia linearmente con la temperatura.

Il loro campo di utilizzo può essere compreso tra -183 °C e 2500 °C con un'accuratezza compresa tra $\pm 0.1\%$ e $\pm 1\%$ del valore misurato. Il diametro delle termocoppie utilizzate in ambito industriale è generalmente compreso tra 0.5 e 1.5 mm.

La relazione tra la differenza di potenziale E_0 e la temperatura è del tipo:

$$E_{AB} = f(A, B, T_1, T_2) = C_1 \cdot (T_1 - T_2) + C_2 \cdot (T_1^2 - T_2^2)$$

dove:

C_1 e C_2 sono costanti termoelettriche che dipendono dai materiali impiegati per realizzare le giunzioni; T_1 e T_2 sono le temperature delle giunzioni.

E' possibile definire il coefficiente $S_{AB} = \frac{\partial E_{AB}}{\partial T}$ è detto coefficiente di Seebeck ed è espresso in V/K o più comunemente, data l'entità delle grandezze in gioco, in $\mu\text{V/K}$.

Una delle due giunzioni viene utilizzata per misurare la temperatura incognita T_1 (definita giunzione calda), mentre l'altra giunzione (definita giunzione fredda) viene mantenuta ad una temperatura di valore noto T_2 .

La curva di graduazione di una termocoppia è non lineare come si può osservare dalla precedente relazione empirica. Lo strumento di acquisizione del segnale della termocoppia, oltre che alla compensazione di giunzione fredda, dovrà tener conto della non linearità della uscita della termocoppia stessa.

Negli strumenti di misura per termocoppie di basso costo sono utilizzati metodi di linearizzazione analogici. Strumenti di elevata qualità hanno implementata al loro interno la tabella di correlazione Tensione-Temperatura delle termocoppie standard per eliminare questa sorgente di errore.

Nella tabella seguente si riportano le sigle standard utilizzate per le termocoppie, i materiali che compongono la giunzione ed il range di temperatura in cui esse sono utilizzabili.

| Tipo | | Limiti di temperatura (°C) | Descrizione |
|---------|------------------|-----------------------------------|--|
| Simbolo | Materiali | | |
| S | Pt10%Rh - Pt | -50 / 1760 | Termocoppia a base di metalli nobili (Platino e Rodio) permette di ottenere misure molto precise. Particolarmente resistente alle alte temperature viene solitamente usata in atmosfere ossidanti. Poco raccomandata in atmosfere riducenti o che contengano vapori di metallo. |
| R | Pt13%Rh - Pt | -50 / 1760 | Come la termocoppia tipo "S" ma con percentuali diverse dei due metalli. |
| B | Pt30%Rh - Pt6%Rh | 0 / 1820 | Termocoppia a base di metalli nobili che grazie alla maggiore quantità di Rodio rispetto ai tipi "S" e "R" la rendono più resistente alle alte temperature ed agli stress meccanici. |
| E | Cr - Co | -270 / 1000 | Termocoppia con alto potere termoelettrico che unisce il polo positivo della termocoppia tipo "K" e il polo negativo della termocoppia tipo "J". Particolarmente indicata in atmosfere ossidanti. |
| J | Fe - Co | -210 / 1200 | Termocoppia formata dal polo positivo in ferro e da quello negativo in costantana (lega a base di rame e nichel). Indicata per misure di medie temperature in atmosfere riducenti e con presenza di idrogeno e carbone. La presenza del ferro ne pregiudica il buon funzionamento in atmosfere ossidanti. |
| K | Cr - Al | -270 / 1370 | Termocoppia a base di leghe contenenti nichel adatta per misure di alte temperature in atmosfere ossidanti. Non utilizzabile in atmosfere riducenti. |
| T | Cu - Co | -270 / 400 | Termocoppia che permette accurate misure a bassa temperatura in atmosfere ossidanti e riducenti. |
| N | Nicrosil - Nisil | -270 / 400 (1) 0 / 1300 (2) | Termocoppia per alte temperature simile alla tipo "K" ma con minor isteresi |
| W3 | W3%Re - W25%Re | 0 / 2310 | Termocoppia per altissime temperature composta da un polo positivo di Tungsteno contenente in 3% di Renio e da un polo negativo di Tungsteno contenente il 25% di Renio. Particolarmente resistente in atmosfere riducenti e in presenza di idrogeno o di altro gas inerte. Non può essere usata in aria o in atmosfere ossidanti. |
| W5 | W5%Re - W26%Re | 0 / 2310 | Termocoppia molto simile alla W3 ma con una percentuale di Renio maggiore che ne aumenta la resistenza meccanica. Altre caratteristiche identiche alla termocoppia tipo W3 |

(1) Termocoppia con fili di diametro 0,32mm
(2) Termocoppia con fili di diametro 1,63mm

Fig. 56 – Tipologie standard di termocoppie

In fig. 56 si riporta, come esempio, la tabella di correlazione tra forza elettromotrice e temperatura per le termocoppie di tipo J. Per ogni colonna si riporta la forza elettromotrice in mV in funzione della temperatura del giunto caldo. Ciascuna colonna fa riferimento ad una specifica temperatura del giunto freddo (giunto di riferimento).

Con riferimento alla fig. 55, il collegamento del volmetro al ramo con materiale A, potrebbe essere effettuato utilizzando un cavo di prolunga. Tale cavo può essere di due tipi:

- Cavo di estensione, quando i due conduttori (positivo e negativo) sono delle stesse leghe dei due elementi della termocoppia e quindi è un'estensione di questi ultimi;
- Cavo di compensazione, quando i due conduttori (positivo e negativo) sono di leghe differenti da quelle che costituiscono gli elementi della termocoppia, ma hanno una forza elettromotrice tale da indurre nello strumento la stessa indicazione di temperatura rilevata dalla termocoppia (questa soluzione è più economica della precedente).

Come i diversi tipi di termocoppie sono indicati secondo la nomenclatura internazionale da una lettera dell'alfabeto, così i cavi di estensione e di compensazione sono indicati da due lettere di cui la seconda solitamente è la lettera X (vedi tabella di figura 35). In tabella vengono riportati, per ogni tipo di termocoppia, i cavi di estensione e compensazione utilizzabili, unitamente alle sigle secondo normativa.

ERMOCOPPIA TIPO "J" (Fe-Co) SECONDO EN 60584-1 (ITS 90)

| °C | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 | -60 | -70 | -80 | -90 | °C |
|---------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------------|
| FEM termoelettrica in mV | | | | | | | | | | | |
| -200 | -7,890 | -8,095 | | | | | | | | | -200 |
| -100 | -4,633 | -5,037 | -5,426 | -5,801 | -6,159 | -6,500 | -6,821 | -7,123 | -7,403 | -7,659 | -100 |
| 0 | 0,000 | -0,501 | -0,995 | -1,482 | -1,961 | -2,431 | -2,893 | -3,344 | -3,786 | -4,215 | 0 |
| °C | 0 | -10 | -20 | -30 | -40 | -50 | -60 | -70 | -80 | -90 | °C |
| | | | | | | | | | | | |
| °C | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | °C |
| FEM termoelettrica in mV | | | | | | | | | | | |
| 0 | 0,000 | 0,507 | 1,019 | 1,537 | 2,059 | 2,585 | 3,116 | 3,650 | 4,187 | 4,726 | 0 |
| 100 | 5,269 | 5,814 | 6,360 | 6,909 | 7,459 | 8,010 | 8,562 | 9,115 | 9,669 | 10,224 | 100 |
| 200 | 10,779 | 11,334 | 11,889 | 12,445 | 13,000 | 13,555 | 14,110 | 14,665 | 15,219 | 15,773 | 200 |
| 300 | 16,327 | 16,881 | 17,434 | 17,986 | 18,538 | 19,090 | 19,642 | 20,194 | 20,745 | 21,297 | 300 |
| 400 | 21,848 | 22,400 | 22,952 | 23,504 | 24,057 | 24,610 | 25,164 | 25,720 | 26,276 | 26,834 | 400 |
| 500 | 27,393 | 27,953 | 28,516 | 29,080 | 29,647 | 30,216 | 30,788 | 31,362 | 31,939 | 32,519 | 500 |
| 600 | 33,102 | 33,689 | 34,279 | 34,873 | 35,470 | 36,071 | 36,675 | 37,284 | 37,896 | 38,512 | 600 |
| 700 | 39,132 | 39,755 | 40,382 | 41,012 | 41,645 | 42,281 | 42,919 | 43,559 | 44,203 | 44,848 | 700 |
| 800 | 45,494 | 46,141 | 46,786 | 47,431 | 48,074 | 48,715 | 49,353 | 49,989 | 50,622 | 51,251 | 800 |
| 900 | 51,877 | 52,500 | 53,119 | 53,735 | 54,347 | 54,956 | 55,561 | 56,164 | 56,763 | 57,360 | 900 |
| 1.000 | 57,953 | 58,545 | 59,134 | 59,721 | 60,307 | 60,890 | 61,473 | 62,054 | 62,634 | 63,214 | 1.000 |
| 1.100 | 63,792 | 64,370 | 64,948 | 65,525 | 66,102 | 66,679 | 67,255 | 67,831 | 68,406 | 68,980 | 1.100 |
| 1.200 | 69,553 | | | | | | | | | | 1.200 |
| °C | 0 | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 | °C |

giunto di riferimento a 0°C

Fig. 57– Termocoppia tipo J – FEM termoelettrica

| TERMOCOPPIE | | | | Cavi di ESTENSIONE e COMPENSAZIONE | | | | | | |
|-------------|------------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------------|---------|----------|-------------------------|-----------------------|---|-----------------|
| Simbolo | Legga | | Temp. Limite °C | FEM In mV a 100°C | Simbolo | | Legga | | Resistività approssimativa lineare a 20°C | |
| | + | - | | | Estens. | Compens. | + | - | Ω/km | mm ² |
| T | Cu ⁽¹⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | -200°C ÷ +350°C | 4,279 | Tx | | Cu ⁽¹⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | 490 | 1 |
| J | Fe ⁽³⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | -40°C ÷ +750°C | 5,269 | Jx | | Fe ⁽³⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | 490 407 | 1 1,5 |
| E | Ni-Cr ⁽⁴⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | -200°C ÷ +900°C | 6,319 | Ex | | Ni-Cr ⁽⁴⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | 490 | 1 |
| K | Ni-Cr ⁽⁴⁾ | Ni-Al ⁽⁵⁾ | -200°C ÷ +1200°C | 4,096 | Kx | | Ni-Cr ⁽⁴⁾ | Ni-Al ⁽⁵⁾ | 490 | 1 |
| | | | | | | Kca (W) | Fe ⁽³⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | 280 | 1 |
| | | | | | | Kcb (V) | Cu ⁽¹⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | 490 | 1 |
| N | Ni-Cr-Si ⁽⁶⁾ | Ni-Si ⁽⁷⁾ | -200°C ÷ +1200°C | 2,774 | Nx | | Ni-Cr-Si ⁽⁶⁾ | Ni-Si ⁽⁷⁾ | | |
| | | | | | | Nc | Cu ⁽¹⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | | |
| R | Pt- 13% Rh ⁽⁸⁾ | Pt ⁽⁹⁾ | -50°C ÷ +1760°C | 0,646 | | Rc | Cu ⁽¹⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | | |
| S | Pt- 10% Rh ⁽⁸⁾ | Pt ⁽⁹⁾ | -50°C ÷ +1760°C | 0,646 | | Sc | Cu ⁽¹⁾ | Cu-Ni ⁽²⁾ | 40 | 1 |
| B | Pt- 30% Rh ⁽⁸⁾ | Pt- 6% Rh ⁽⁸⁾ | 0°C ÷ +1820°C | 0,033 | | Bc | Cu ⁽¹⁾ | Cu-Mn ⁽¹⁰⁾ | 100 91 | 1 1,5 |

Fig. 58 – Caratteristiche dei cavi di prolunga per termocoppie

Anche i connettori per termocoppie sono standardizzati, essendo codificati come dimensioni, colori e tipologia dei contatti. In fig. 36 si riporta come esempio lo standard dei connettori miniatura.

Connettori miniatura per termocoppie

Questi connettori miniatura hanno i pin piatti e sono ideali per collegare termocoppie a cavi di estensione o di compensazione. I pins sono polarizzati per evitare errori di connessione, e sul corpo è anche ripetuta la polarità. Possono raggiungere temperature fino a 210°C, 350°C o 650°C.

Oltre alle classiche spina e presa, sono disponibili prese da pannello e versioni a 3 pin, con i corrispondenti pannelli in alluminio anodizzato. Sono anche disponibili astucci impermeabili in neoprene per una migliore protezione in ambienti umidi e pressacavi con altri numerosi accessori.

- Possono raggiungere 210°C, 350°C o 650°C
- Sono adatti per conduttori di diametro fino a 0,6 mm
- Colori secondo la norma BS4937 Parte 30:1993 Tipo K: verde – tipo T: marrone, tipo J: nero – tipo N: viola – tipo RCA/SCA : arancione
- Dimensioni: Spina (maschio) 19x16x8 mm (lunghezza x larghezza x profondità) con pins lunghi 12 mm. Presa (femmina) 26 x 16 x 8 mm (lunghezza x larghezza x profondità). Prese da pannello come prese normali ma con clip o alette per il fissaggio al pannello
- Sono disponibili pressacavi, astucci impermeabili in neoprene e altri accessori

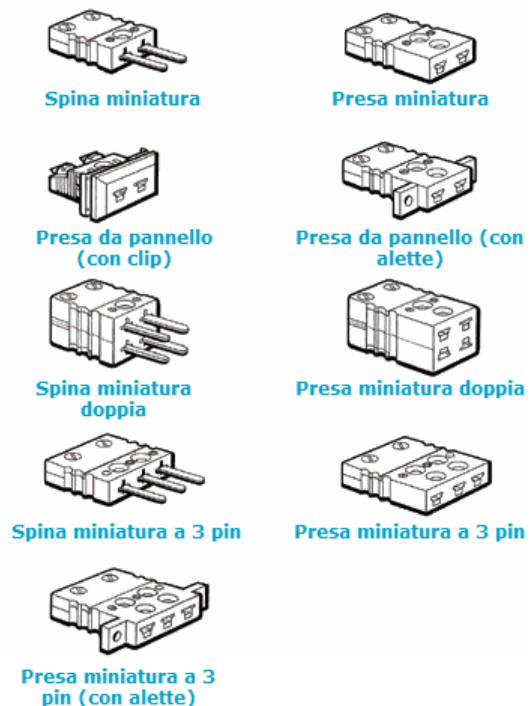


Fig. 59 – Connettori per termocoppie

6.2.1.1 Tipologie costruttive

Per quanto riguarda le tipologie costruttive, le termocoppie si possono dividere in termocoppie con isolamento tradizionale e con isolamento minerale.

La tabella seguente mostra le principali caratteristiche delle due tipologie:

| | Velocità di risposta | Isolamento elettrico | Resistenza alle vibrazioni | Resistenza alle pressioni |
|----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------|---------------------------|
| Isolamento tradizionale | Sufficiente | Buono | Sufficiente | Buono |
| Isolamento minerale (MgO) | Ottimo | Buono | Ottimo | Ottimo |

Fig. 60 – Tipologie costruttive delle termocoppie

Nelle figure 61 e 62 sono riportati gli schemi costruttivi dei due tipi di termocoppie precedentemente descritte. In figura 40 sono invece riportate le modalità di realizzazione del giunto caldo per le termocoppie ad isolamento minerale.

Le termocoppie con isolamento tradizionale sono costituite da:

1- Giunto di misura

Il giunto di misura o giunto caldo è la zona in cui i due conduttori della termocoppia sono uniti tra loro; essendo la sua dimensione di dimensioni ridotte, possiamo considerare la misura con le termocoppie di tipo puntiforme. L'esecuzione di questa giunzione deve essere fatta in modo tale da non presentare tensioni meccaniche sui due conduttori (specialmente per quanto riguarda le termocoppie a base di metallo nobile) in quanto queste, una volta in temperatura, pregiudicherebbero il corretto funzionamento della termocoppia.

2- Fili della termocoppia

I fili della termocoppia dovranno essere dimensionati adeguatamente in base alle condizioni di impiego; è possibile inserire nella stessa sonda due o più termocoppie.

3- Isolatori ceramici

Gli isolatori ceramici servono per mantenere isolati i fili della termocoppia per tutta la lunghezza della sonda tra di loro e verso la guaina esterna.

4- Guaina di protezione

La guaina di protezione ha lo scopo di proteggere i fili della termocoppia. Questa, essendo a contatto con il processo, è importante che sia costituita dal giusto materiale è che abbia le giuste dimensioni. La guaina di protezione è solitamente metallica tuttavia è possibile che questa sia in materiale ceramico se la temperatura risulti molto elevata. In condizioni particolari è opportuno ricoprire la guaina con un ulteriore protezione (pozzetto termometrico).

5- Testa di connessione

La testa di connessione contiene una morsettiere di materiale isolante (normalmente ceramica) che permette il collegamento elettrico della termocoppia, in funzioni delle condizioni di impiego possono essere usate custodie antideflagranti.

Al posto della morsettiere è possibile installare un convertitore con uscita 4-20mA.

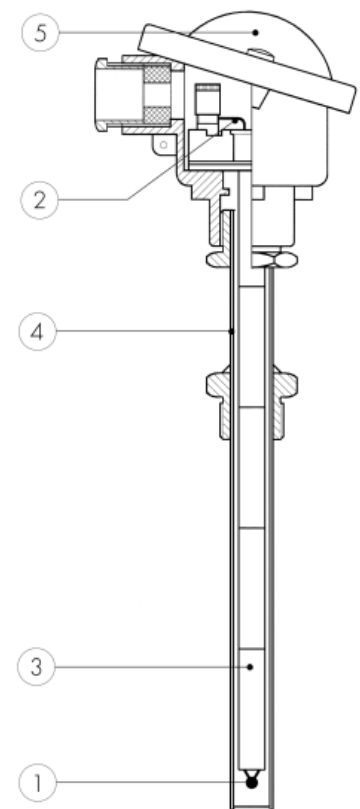


Fig. 61 – Termocoppie con isolamento tradizionale

Questa particolare tipologia costruttiva permette di realizzare termocoppie di elevate prestazioni e con caratteristiche meccaniche eccellenti. Le principali caratteristiche costruttive di questo tipo di realizzazione possono essere così riassunte: - possibilità di realizzare termocoppie di dimensioni molto ridotte (a partire da 0,5mm di diametro)
- possibilità di piegare la guaina con raggi di curvatura molto stretti
- considerevole aumento della durata media della termocoppia
- possibilità di realizzare termocoppie molto lunghe.

1- Giunto di misura

Con l'utilizzo di particolari tecniche viene realizzata l'unione dei due conduttori costituenti la termocoppia all'interno del cavo isolato in ossido minerale e quindi si procede alla chiusura dello stesso. Il giunto di misura può essere isolato, a massa oppure esposto (vedi tabella)

2- Fili della termocoppia

All'interno del cavo isolato in ossido minerale si possono trovare due, quattro o sei fili; la termocoppia potrà quindi essere semplice, doppia o tripla.

3- Guaina con isolamento minerale

Questa è composta da una guaina metallica contenente i conduttori isolati tra loro e dalla guaina stessa per mezzo di ossidi metallici purissimi e altamente compressi; l'isolamento standard è l'ossido di magnesio MgO.

4- Testa di connessione

La testa di connessione contiene una morsettiera di materiale isolante (normalmente ceramica) che permette il collegamento elettrico della termocoppia, in funzione delle condizioni di impiego possono essere utilizzate custodie antideflagranti. Al posto della morsettiera è possibile installare un convertitore con uscita 4-20mA.

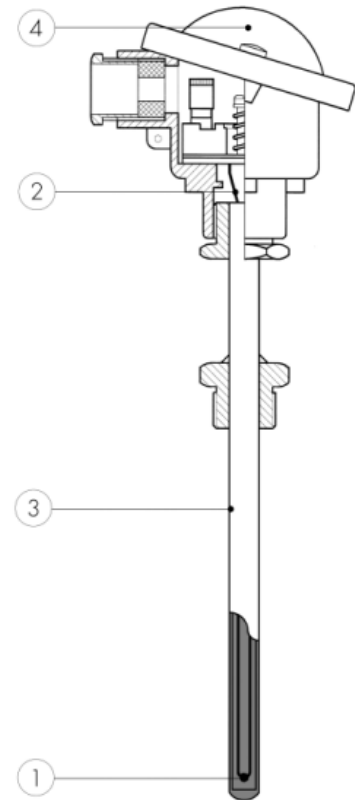
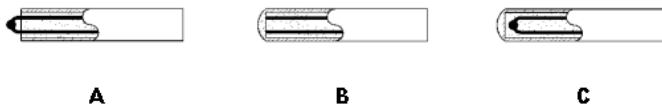


Fig. 62 – Termocoppie con isolamento minerale (MgO)



A- Giunto caldo esposto

Caratterizzato da un ridottissimo tempo di risposta in quanto lo stesso è a diretto contatto con l'ambiente in cui si deve misurare la temperatura; tuttavia ne è sconsigliato l'utilizzo in ambienti corrosivi .

B- Giunto caldo a massa

In questo tipo di realizzazione il giunto di misura è parte integrante della guaina di protezione e di conseguenza il tempo di risposta è abbastanza ridotto, l'esecuzione dello stesso è conforme alle norme ASTM-E-235 . Consigliato in presenza di alte pressioni (fino a 3500Kg/cm2).

C- Giunto caldo isolato

Il giunto caldo è completamente isolato dalla guaina di protezione e quindi particolarmente indicato nei casi in cui fem parassite potrebbero falsare la misura. L'esecuzione dello stesso è conforme alle norme ASTM-E-235.

Fig. 63 – Termocoppie con isolamento minerale (MgO) – Realizzazione giunto di misura

LEGGI DELLE TERMOCOPPIE

Le termocoppie sono governate da sei leggi di cui tre sono di seguito riportate:

I legge: un circuito di una termocoppia deve prevedere almeno due materiali e due giunzioni.

II legge: la tensione E_0 fornita da una termocoppia dipende solo dalla differenza delle temperature delle giunzioni ($T_1 - T_2$), mentre è del tutto indipendente da qualsiasi altra temperatura presente nel circuito.

III legge: se un terzo materiale C viene introdotto in un ramo del circuito di materiale A e le due nuove giunzioni A/C e C/A sono mantenute alla stessa temperatura, la E_0 non subisce variazioni.

SCHEMI DI COLLEGAMENTO DELLE TERMOCOPPIE

Per misurare la tensione prodotta da una termocoppia, si fa uso di un voltmetro ad alta impedenza, come rappresentato nello schema di fig. 64. Nella figura osserviamo che la termocoppia (A-B) ha una giunzione J_x (chiamata giunzione calda) alla temperatura incognita T_x mentre l'altra giunzione J_{ref} (chiamata giunzione fredda o di riferimento) si trova alla temperatura di riferimento T_{ref} . La tensione ai terminali della termocoppia sarà dunque: $e = S_{AB}(T_x - T_{ref})$ e la misureremo portando i terminali del metallo A sulle bocche d'ingresso (Hi e Lo) del voltmetro.

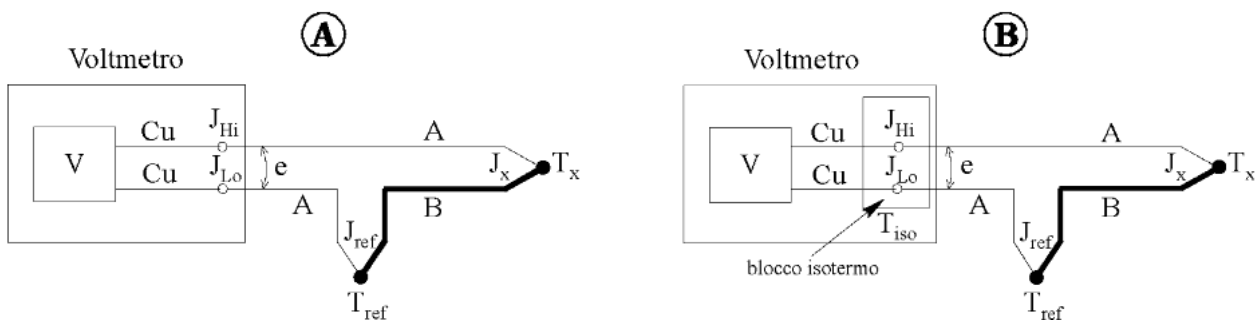


Fig. 64 – Schema di collegamento delle termocoppie

Poiché le bocche e i circuiti interni dello strumento sono realizzati in rame, si formeranno in ingresso allo strumento due nuove giunzioni J_{Hi} e J_{Lo} , di tipo Cu-A, necessarie ma indesiderate, che potrebbero introdurre tensioni spurie.

Con riferimento a quest'aspetto, per la terza legge delle termocoppie, inserendo nel circuito della termocoppia (A-B) un terzo metallo (il rame Cu, nel circuito di Fig. 64A), se le due nuove giunzioni (Cu-A) si trovano entrambe alla stessa temperatura, allora la tensione totale e della termocoppia rimane invariata. Tale proprietà consente di inserire il voltmetro nel circuito della termocoppia, senza modificarne le condizioni. Uno schema che traduce in pratica quanto detto può essere visto in Fig. 41B, dove è stato realizzato il blocco isoterma che racchiude le due giunzioni (J_{Hi} e J_{Lo}) alla temperatura T_{iso} . Ne consegue che, se la giunzione J_{ref} viene portata nel blocco isoterma alla temperatura T_{iso} (v. Fig. 65B), la temperatura incognita T_x risulta riferita alla temperatura $T_{iso} = T_a = T_{ref}$.

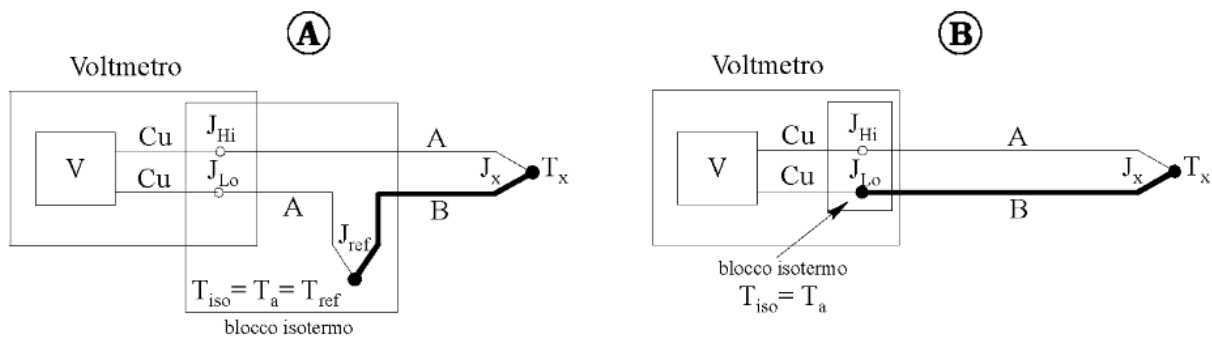


Fig. 65 – Schema di collegamento delle termocoppie

I metodi di misura di misura con le termocoppie possono essere divisi generalmente in due tipi:

Il primo, come riportato in Fig. 65, viene generalmente utilizzato nel campo industriale dove non sono necessarie precisioni estreme. In questo caso la termocoppia viene collegata direttamente o per mezzo di cavi compensati o di estensione allo strumento di misura.

In questo caso la compensazione del giunto di riferimento viene effettuata direttamente dallo stesso strumento di misura che, rilevando la temperatura della giunzione per mezzo di altri tipi di sensori, modifica elettronicamente il segnale della termocoppia stessa in modo da essere dipendente solamente dalla temperatura del giunto di misura e quindi dalla temperatura da misurare.

Il secondo invece, ottenuto ponendo il blocco isoterma ad una temperatura costante nota, permette di realizzare misure molto accurate e per questo motivo viene utilizzato quasi esclusivamente nelle applicazioni di laboratorio (v. Fig. 66).

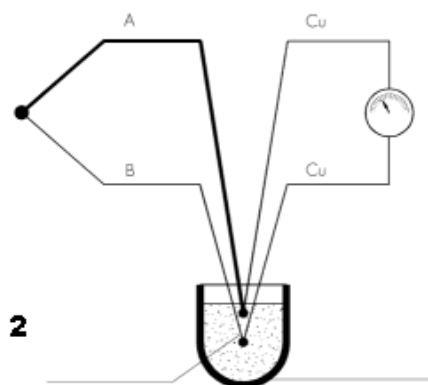


Fig. 66 – Giunto freddo (o di riferimento) mantenuto a T costante

In questo caso la temperatura del giunto di riferimento viene mantenuta ad una temperatura nota e costante (solitamente il punto di fusione del ghiaccio a 0°C) per mezzo di procedimenti manuali o automatici allo scopo di compensare la forza elettromotrice rilevata dallo strumento di misura con quella corrispondente del giunto di misura.

Le principali cause di errore in cui si può incorrere durante la misura della temperatura con le termocoppie sono le seguenti:

- Collegamento della termocoppia con lo strumento di misura con un cavo non adatto;
- Inversioni di polarità nei vari collegamenti;
- Fem parassite;
- Errata compensazione del giunto di riferimento.

Tutti i collegamenti tra le termocoppie e gli strumenti di misura devono essere effettuati con cavi di estensione o compensati adatti. Esistono infatti cavi compensati per ogni tipo di termocoppia, la scelta del tipo di isolante e delle dimensioni dipendono unicamente dalle condizioni di utilizzo.

Tutti i cavi di compensazione e/o di estensione per termocoppie hanno una colorazione che identifica sia il tipo di termocoppia che la sua polarità, è quindi importante fare attenzione ad evitare di invertire le polarità negli eventuali collegamenti.

E' tuttavia buona norma, nei collegamenti tra le termocoppie e gli strumenti di misura, fare meno giunzioni possibili e comunque usare appositi dispositivi con contatti compensati che impediscono anche le inversioni di polarità.

Nel caso in cui si stia utilizzando delle termocoppie con giunto di misura a massa è possibile che eventuali fem parassite vengano introdotte dalla termocoppia verso lo strumento di misura ed essendo il segnale delle termocoppie in mV è molto facile che questo venga falsato o disturbato. E' quindi opportuno passare all'utilizzo di termocoppie con giunto di misura isolato.

6.2.2 5.2.2 Termoresistenze

I termometri a resistenza possono essere schematizzati come costituiti da un elemento sensibile che mostra un cambiamento della resistenza elettrica in presenza di una variazione della sua temperatura. Sono anche definiti RTD (*Resistance Temperature Detector*).

La catena di misura è inoltre costituita da un'unità di manipolazione che converte, in generale, la variazione di resistenza in variazione di tensione od intensità di corrente continua ed, infine, uno strumento terminale provvede alla registrazione ed alla presentazione degli andamenti del segnale in uscita.

Il loro campo di utilizzo è compreso tra -190 °C e 660 °C.

La resistenza elettrica di un conduttore è espressa dalla relazione:

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Essendo ρ la resistività del materiale (che è una funzione della temperatura), L la lunghezza del conduttore ed S la sua sezione.

La variazione relativa della resistenza rispetto alla temperatura è espressa dalla relazione:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} + \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} - \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T}$$

nei materiali usuali il primo termine del secondo membro è dell'ordine di $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$, mentre la somma degli altri due membri, che coincide con il coefficiente di dilatazione termica volumetrico è dell'ordine di $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, pertanto questi ultimi possono essere trascurati e si ottiene:

$$\frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \approx \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T}$$

Si può quindi misurare la variazione di temperatura misurando la variazione di resistenza di un elemento.

Uno dei materiali più utilizzati per la realizzazione di termoresistenze è il platino, soprattutto per la sua resistenza alla corrosione (la ruggine, alterando la resistenza del componente, introduce errori nella misura) e per la sua curva di graduazione pressochè lineare.

Per il platino il legame tra resistenza e temperatura è espresso dalla relazione:

$$R_{(T)} = R_0 [1 + \alpha \cdot \Delta T + \beta \Delta T^2 + \dots]$$

Dove α , β e sono coefficienti sperimentali e ΔT è la variazione rispetto alla temperatura T_0 alla quale è calcolata R_0 .

Nella figura seguente è riportato l'andamento delle curve resistenza elettrica-temperatura per i materiali più comunemente utilizzati.

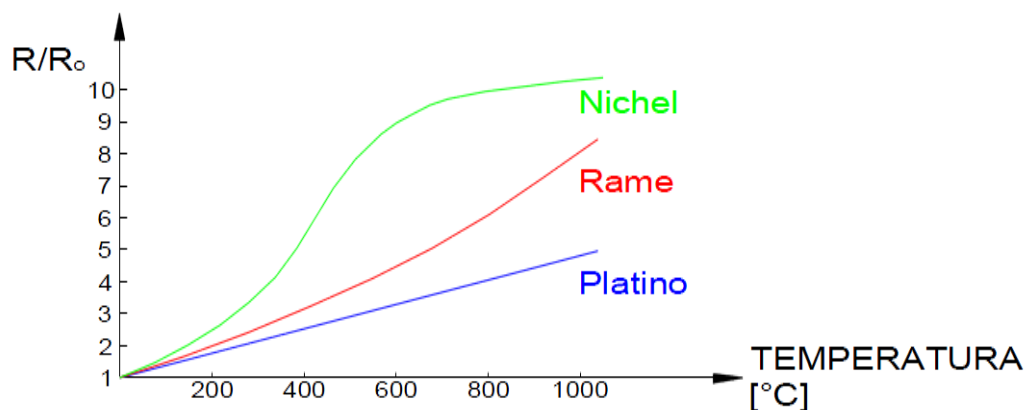


Fig. 67 – Variazione di resistenza di alcuni materiali con la temperatura

La termoresistenza classica, detta PT100 (dalla sigla del platino e dalla resistenza a 0°C di 100 Ohm), introdotta nel 1932, era costituita da un filo di platino (di diametro 0,025 mm), lungo circa 0.5 m avvolto ad elica su un supporto di mica. Oggi le moderne tecniche consentono di depositare uno strato di platino su un supporto ceramico per mezzo di tecniche laser. La precisione del PT100 è dell'ordine dello 0.1% tra 0 e 850°C.

In alternativa al platino si usa il nichel che ha una più elevata sensibilità (più elevato valore di dR/dT) ed un più basso costo e che presenta una precisione dell'1% tra 0 e 150 °C e del 4% tra -60 e 0°C.

Altro materiale utilizzato è il rame (range di misura tra -200 e 150 °C) con precisione dell'ordine dello 0.3%.

Nel caso del platino la relazione tra resistenza e temperatura viene descritta dall'equazione di *Callendar-Van Dusen corretta* nel range di temperatura -200°C e 0°C:

$$R = R_0 \cdot [(1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot (t - 100) \cdot t^3)]$$

Nel range di temperatura tra 0°C e 661°C vale l'equazione di *Callendar-Van Dusen standard*:

$$R = R_0 \cdot [(1 + A \cdot t + B \cdot t^2)]$$

dove:

R = resistenza alla temperatura t (°C)

R0 = resistenza a 0°C

t = temperatura in °C

Nelle tabelle successive sono mostrati i valori di resistenza e di tolleranza per le due classi (A e B) della sonda PT100 alle varie temperature.

| Classi di tolleranza termometri a resistenza Pt100 per classi A e B secondo IEC 60751 | | | | |
|---|------------|-----------|----------|-----------|
| Temperatura °C | Tolleranza | | | |
| | Classe A | | Classe B | |
| | + / - °C | + / - Ohm | + / - °C | + / - Ohm |
| -200 | 0.55 | 0.24 | 1.3 | 0.56 |
| -100 | 0.35 | 0.14 | 0.8 | 0.32 |
| 0 | 0.15 | 0.06 | 0.3 | 0.12 |
| 100 | 0.35 | 0.13 | 0.8 | 0.30 |
| 200 | 0.55 | 0.20 | 1.3 | 0.48 |
| 300 | 0.75 | 0.27 | 1.8 | 0.64 |
| 400 | 0.95 | 0.33 | 2.3 | 0.79 |
| 500 | 1.15 | 0.38 | 2.8 | 0.93 |
| 600 | 1.35 | 0.43 | 3.3 | 1.06 |
| 650 | 1.45 | 0.46 | 3.6 | 1.13 |
| 700 | / | / | 3.8 | 1.17 |
| 800 | / | / | 4.3 | 1.28 |
| 850 | / | / | 4.6 | 1.34 |

| Valori di resistenza | |
|----------------------|------------|
| Temp.°C | Pt 100 Ohm |
| -200 | 18.52 |
| -150 | 39.72 |
| -100 | 60.26 |
| -50 | 80.31 |
| 0 | 100.0 |
| 50 | 119.4 |
| 100 | 138.51 |
| 150 | 157.33 |
| 200 | 175.33 |
| 250 | 194.10 |
| 300 | 212.05 |
| 350 | 229.72 |
| 400 | 247.09 |
| 450 | 264.18 |
| 500 | 280.98 |
| 550 | 297.49 |
| 600 | 313.71 |
| 650 | 329.64 |
| 700 | 345.28 |
| 750 | 360.64 |
| 800 | 375.70 |

Fig. 68 – Classi di tolleranza per sonde PT100

6.2.2.1 Catene di misura

Per la misura del valore della resistenza, da tradurre in temperatura attraverso le curve precedentemente descritte, si utilizza il metodo con ponte di Wheatstone ed il metodo Volt-Amperometrico descritti al par. 5.4.5.2.

Con riferimento alla Fig. 39 del par. 5.4.5.2, il blocco di resistenze sarà tarato per bilanciare il ponte con una resistenza R_x pari a 100Ω (nel caso del sensore PT100). In questa configurazione il ponte risulterà equilibrato quando la sonda PT100 si trova ad una temperatura di 0°C .

Sempre con riferimento alla Fig. 39 del par. 5.4.5.2, si utilizzerà un ponte con un solo ramo attivo (cioè con una sola resistenza variabile costituita dallo stesso sensore). Le resistenze del ponte, sempre per un sensore PT100, hanno i seguenti valori:

$$R = R_1 = R_2 = R_4 = R_x(a\ 0^\circ\text{C}) = 100\ \Omega$$

Definendo ΔR come la variazione della resistenza della sonda PT100 nel passaggio dalla temperatura di 0°C alla generica temperatura T , lo squilibrio di tensione V_U nel ponte vale:

$$V_U = \frac{V_A}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R}$$

dove V_A è la tensione di alimentazione del ponte. La lettura di V_U attraverso un voltmetro ad alta sensibilità, determina la valutazione di ΔR , della $R_x(T)$ e quindi della temperatura attraverso la tabella in Fig. 45. Per annullare il disturbo prodotto dalla resistenza dei cavi di collegamento, si utilizza lo schema di connessione a tre fili.

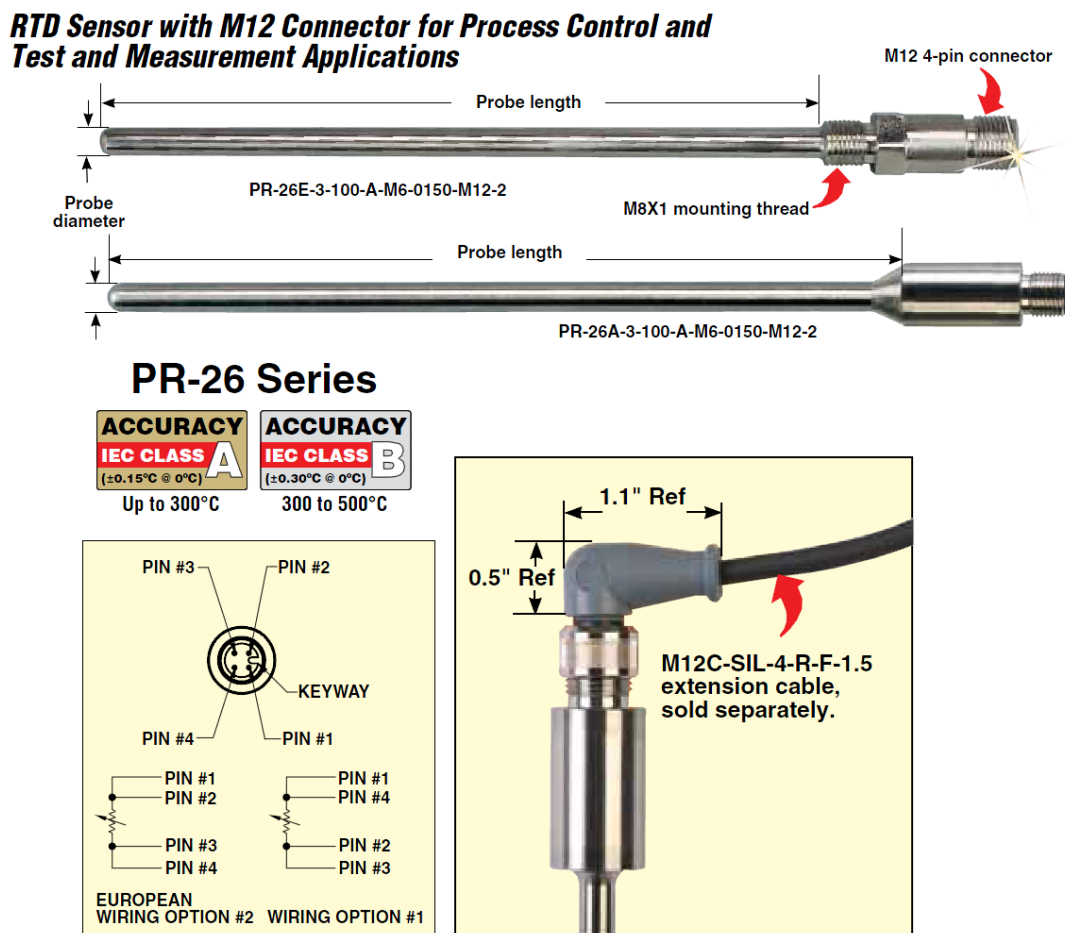
Un altro sistema per valutare la resistenza del sensore al variare della temperatura è l'utilizzo del sistema di misura volt-amperometrico, riportato sempre nel par. 5.4.5.2. Con riferimento alla Fig. 43, la resistenza R_x è la resistenza del sensore che si valuta attraverso la:

$$R_x = \frac{V_U}{I}$$

dove: V_U è la tensione misurata dal voltmetro e I è il valore della corrente prodotta dal generatore di corrente costante.

Il collegamento con il sensore è del tipo a 4 fili.

6.2.2.2 Tipologie costruttive



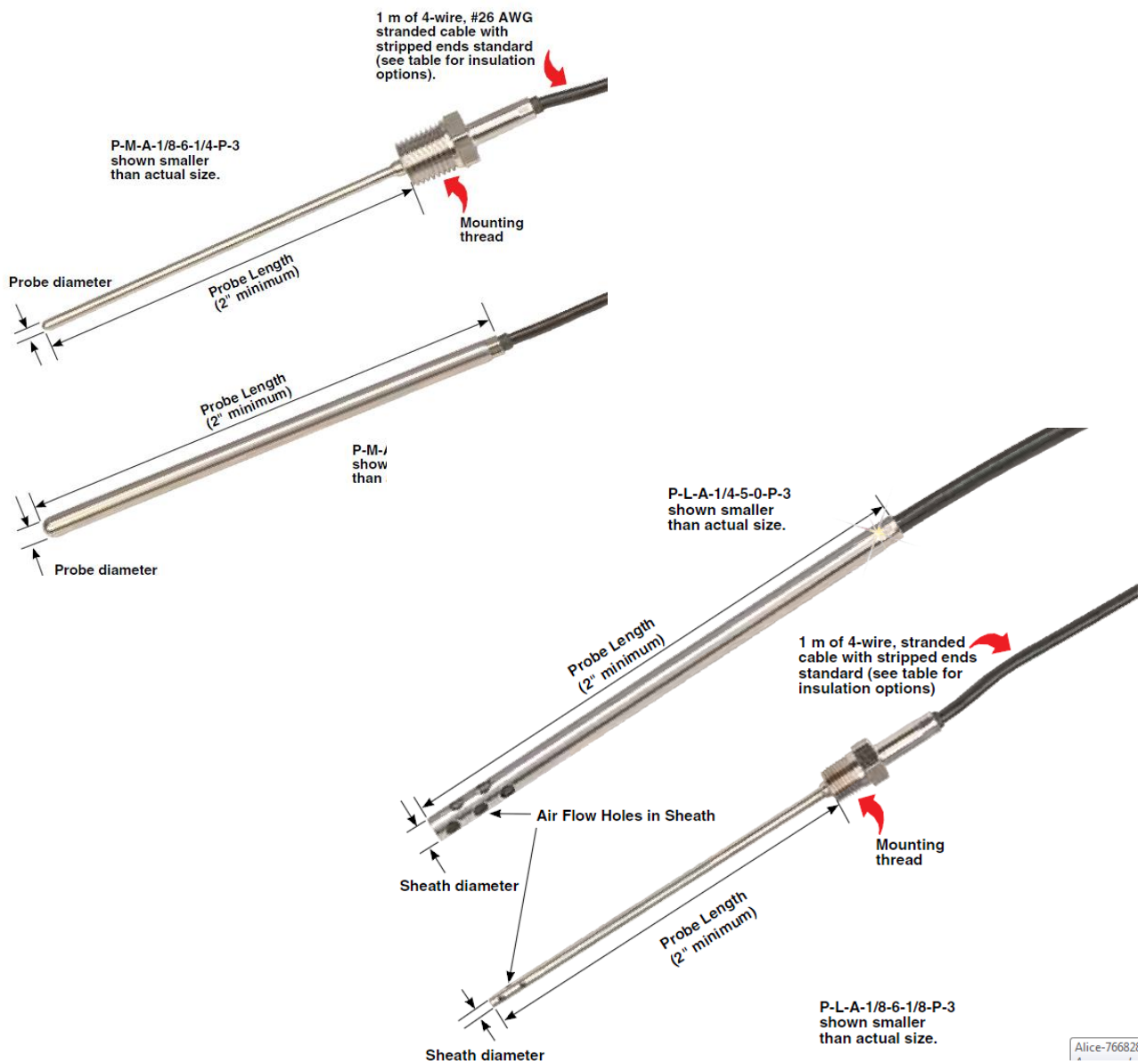


Fig. 69 – Tipologie costruttive delle termoresistenze

6.2.3 Termistori

Il termistore è un sensore che trasforma variazioni di temperatura in variazioni di resistenza, ma a differenza delle termoresistenze, l'elemento sensibile è un semiconduttore.

La dipendenza della resistenza di un termistore dalla temperatura è influenzata non solo dalla variazione delle sue dimensioni fisiche, ma anche da altri fattori quali il tipo di drogante e l'entità della drogatura cui il materiale semiconduttore è sottoposto. Con un'opportuna scelta della drogatura è possibile aumentare la sensibilità del termistore, ottenendo così una sensibilità alla temperatura molto maggiore di quella ottenibile con un metallo.

I termistori possono essere divisi in due categorie, basate sull'andamento della resistenza all'aumentare della temperatura: NTC (Negative Temperature Coefficient) e PTC (Positive Temperature Coefficient) mostrati in Fig. 46.

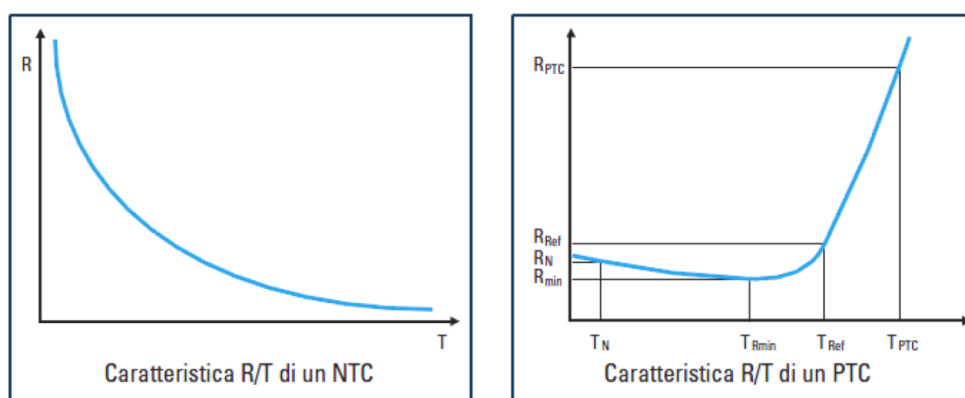


Fig. 70 – Curve Resistenza elettrica-Temperatura per termistori

I termistori sia NTC che PTC sono componenti ceramici costituiti da una struttura policristallina ottenuta per sinterizzazione di ossidi metallici e non, opportunamente miscelati. I dispositivi NTC sono ottenuti dalla sinterizzazione di ossidi metallici drogati come Mn_2O , NiO , Co_2O_3 , Cu_2O , Fe_2O_3 e TiO_2 , mentre i dispositivi PTC sono realizzati con materiale ceramico a base di titanio e bario con aggiunte di piombo o zirconio. In commercio esistono anche PTC costituiti da silicio drogato, generalmente con boro, che hanno una caratteristica resistenza-temperatura più regolare. I vantaggi della sinterizzazione risiedono nella possibilità di utilizzare sensori di qualunque forma e dimensioni e con costanti di tempo bassissime (dovute alle piccole dimensioni).

La geometria dei termistori può variare da produttore a produttore, ma le forme più utilizzate e comuni sono mostrati in Fig. 70.

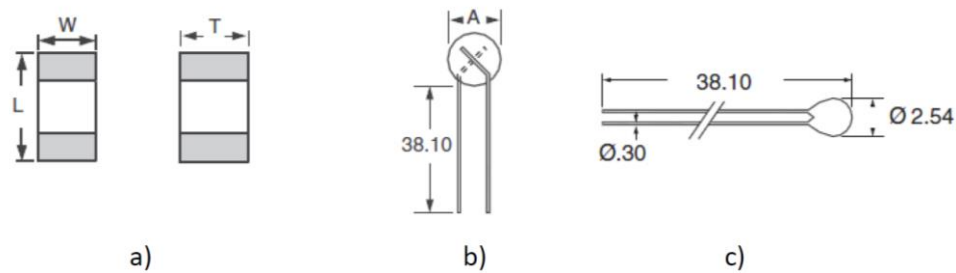


Fig. 71 – Geometrie dei termistori

- a) termistore a chip ceramico con le seguenti dimensioni: lunghezza $1 < L < 2$ mm, larghezza $0,5 < W < 1,25$ mm e spessore $0,6 < T < 1,3$ mm;
- b) termistore a disco rivestito di materiale epossidico con diametro A che varia da 2,79 a 12,19 mm;
- c) termistore a sfera incapsulato in materiale epossidico.

Le caratteristiche della catena di misura sono analoghe a quelle descritte per le termoresistenze.

6.2.4 Confronto tra RTD e Termistori

Quando usare le RTD

- Quando precisione e stabilità sono l'obiettivo principale dell'applicazione
- Quando va mantenuta la precisione su un ampio intervallo di temperatura
- Quando la misurazione su un'area piuttosto che su un punto migliora il controllo
- Quando è desiderabile un alto livello di standardizzazione

Quando usare i termistori

- Quando l'applicazione richiede un'alta risoluzione su un intervallo stretto
- Quando il basso costo è una considerazione primaria
- Quando si richiede rilevazione su un punto singolo o miniaturizzazione

Vantaggi delle RTD

- Lineari su un ampio intervallo operativo
- Ampio intervallo operativo di temperatura
- Intercambiabilità su un ampio intervallo
- Migliore stabilità ad alte temperature

Svantaggi delle RTD

- Bassa sensibilità
- Costi maggiori
- Non misura punti singoli
- Influenzata da urti e vibrazioni
- Richiede funzionamento a tre o quattro cavi
- Può essere influenzata dalla resistenza di contatto

Vantaggi dei Termistori

- Risposta rapida (1÷10s)
- Piccole dimensioni
- L'alta resistenza elimina molti dei problemi legati alla resistenza dei cavi
- Solido, non influenzato da urti o vibrazioni
- Costo inferiore

Svantaggi dei Termistori

- Non lineare
- Intervallo di misura ristretto per ciascuna unità